

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: **B 2612 ELEKTROTECHNIKA A INFORMATIKA**

Studijní obor: **2612R011 Elektronické informační a řídicí systémy**

Řízený stejnosměrný zdroj

Controlled Power Supply

Bakalářská práce

Autor: Jakub Hlavatý

Vedoucí BP práce: Prof. RNDr. Ing. Miloslav Košek, CSc.

Konzultant: Ing. Tomáš Mikolanda

V Liberci 15.5.2007

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 stran

Seznam odborné literatury:

Jedná se o speciální praktický problém. Případné potíže se budou řešit vyhledáváním na webu.

Vedoucí bakalářské práce: Prof. RNDr. Ing. Miloslav Košek, CSc.

Konzultant: Ing. Tomáš Mikolanda

Zadání bakalářské práce: 10.10.2006

Termín odevzdání bakalářské práce: 18. 5. 2007



Vedoucí katedry

Děkan

V Liberci dne 17.10.2006

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum 15.5.2007

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Ing. Tomášovi Mikolandovi za konzultace ohledně bakalářské práce, pomoc při řešení problémů a naměření charakteristik.

Rád bych poděkoval **Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D.** za pomoc při měření zatěžovacích charakteristik a zapůjčení laboratorních zdrojů s vybavením TUL.

Prof. RNDr. Ing. Miloslavu Koškovi, CSc. za podklady a úpravy pro bakalářskou práci.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá napájecím zdrojem s integrovaným obvodem MAA 723, který je využíván v mnoha typických zapojeních. V práci je postupně popsána problematika zdrojů, následně podrobný popis funkce zdroje, oživení zdroje, výpočet chlazení a jeho konstrukce. Přílohy obsahují jednotlivé desky plošných spojů a použité součástky včetně naměřených zatěžovacích charakteristik. Konkrétním výsledkem práce je symetrický regulovatelný napájecí zdroj v napěťovém rozsahu do 30 V a proudovém do 3A s poměrně důkladnou dokumentací.

Bylo provedeno důkladné proměření zdroje na plně automatizované aparatuře. Ze zatěžovacích charakteristik určen průměrný vnitřní odpor zdroje $R_i=0,29 \Omega$. Hodnota zvlnění se při změně zátěže pohybuje v rozmezí 0-10 mV. Při změně síťového napětí se napětí zdroje téměř nemění. Zdroj dává stabilní napětí asi 30 minut po zapnutí. Zdroj má dvě identické části a spolehlivou ochranu proti přetížení. Podle naměřených parametrů se zdroj jeví pro běžné použití (zejména oživování obvodů) jako dostačující. V porovnání s komerčními zdroji má téměř shodné parametry s výjimkou vyššího vnitřního odporu a poněkud horší stability v blízkosti maxim napětí a proudu. V cenové kategorii obdobných zdrojů obstál výrobek nejlépe, pokud nezapočítáváme práci. Zdroj je určen pro uživatele, kteří ocení velmi nízkou pořizovací cenu a mají dostatek zručnosti a zkušeností k sestavení.

Klíčová slova

Napájecí zdroj, integrovaný obvod MAA 723, DPS

Abstract

This bachelor's essay deals with a power supply with integrated circuit MAA 723, which is used in a lot of connections. The following issues are dealt with in this essay - problems related to power sources, detailed description of the power supply function, power supply recovery, calculation of cooling and its construction. Enclosed appendices contain individual printed circuit boards and components used, including measured load diagrams. The essay results in a symmetric adjustable power supply in voltage range up to 30 V and current range up to 3 A, including thorough documentation.

A careful measurement of the supply was performed on fully automated equipment. Measuring the assembled power supply using load diagrams, the average internal resistance equals $R_i=0,29\ \Omega$. The waviness value with the change of load fluctuates changes within the range of 0 - 10 mV. When the effective input voltage is changed, the output voltage value changes minimally. The designed power source supplies stable voltage for about 30 minutes after switching on. It has two identical parts and a reliable protection against overloading. According to the measured parameters the supply appears suitable for common use, especially for circuit debugging. The parameters of the power supply are, in comparison to other commercial power supplies, very similar, except for the values of waved voltage and internal resistance, which are slightly higher. In its price range the supply proved to be the best, providing we do not include the time spent assembling. The supply is meant for users who appreciate very low purchase cost and are skilled and experienced enough to assemble it.

Keywords

Power supply, integrated circuit MAA 723, DPS

OBSAH

ÚVOD.....	8
1. SROVNÁNÍ LABORATORNÍCH ZDROJŮ.....	9
1.1. Laboratorní zdroje s jednoduchou regulací.....	9
1.2. Laboratorní zdroje s dvojitou regulací.....	10
2. NAPÁJECÍ ZDROJE.....	14
2.1. Síťové zdroje stejnosměrného napětí.....	15
2.2. Síťové zdroje klasické koncepce	16
2.2.1. Síťový transformátor	17
2.2.2. Usměrňovač.....	17
2.2.3. Usměrňovač s kapacitním výstupem	18
2.3. Spínané síťové zdroje	19
2.4. Měníče impulsně regulovatelného zdroje.....	19
2.4.1. Blokující měnič	19
2.5. Sériové stabilizátory s neregulovatelným a regulovatelným napětím	20
3. KONSTRUKCE ZDROJE.....	22
3.1. Zobrazovací část	23
3.2. Popis významných použitých součástek.....	24
3.2.1. Integrovaný obvod MAA 723	24
3.2.2. Některé charakteristické údaje.....	26
3.2.3. Integrovaný obvod ICL 7107	26
4. SCHÉMATA.....	28
4.1. Elektrické schéma zdrojové části.....	28
4.2. Elektrické schéma A/D převodníku a zobrazovací jednotky,.....	29
5. POZNÁMKY K CHLAZENÍ, NASTAVENÍ MĚŘIDEL.....	30
5.1. Výpočet chlazení výkonové části.....	31
6. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ ZDROJE.....	32
6.1. Výkres předního panelu s uspořádáním jednotlivých prvků.....	32
6.2. Mechanické uspořádání předního panelu.....	33
6.3. Ostatní mechanické prvky	33
7. FINÁLNÍ PODOBA NAPÁJECÍHO ZDROJE.....	34
8. POČÍTAČOVÁ KARTA PCI-1711.....	35
9. MĚŘENÍ	36
10. VÝSLEDKY	38
10.1. Zatěžovací charakteristika	38
10.2. Charakteristiky v oblasti proudového omezení	42
10.3. Zvlnění napětí	44
10.4. Dynamická charakteristika	47
10.5. Vliv změny síťového napětí.....	50
10.6. Časová stabilita.....	51
11. DISKUZE.....	53
12. ZÁVĚR	55
13. POUŽITÁ LITERATURA.....	57
14. PŘÍLOHY A SOUBORY	58

ÚVOD

Stejnoseměrný zdroj je nezbytnou součástí každého elektronického systému. Lze je dělit do tří kategorií:

1. Pro jedno pevné napětí
2. S regulovatelným stabilizovaným napětím
3. Regulovatelný s normálním napětím

Největší pozornost je věnována druhé kategorii, poněvadž částečně splňují požadavek nejvyšší kategorie, o nejnižší nemluvě. V praxi jsou masově používány. Při realizaci lze použít známých zapojení a obvodů, přičemž lze připravovat výrobky v širokém rozsahu parametrů a kvality.

Při pořizování zdroje lze postupovat dvěma způsoby:

1. Na trhu sehnat výrobek požadovaných parametrů.
2. Připravit zdroj vlastními prostředky.

Druhá možnost přichází v úvahu za těchto podmínek:

1. Požadavky jsou natolik speciální, že vhodný výrobek na trhu není.
2. Uživatel chce mít možnost zasahovat do zapojení s cílem měnit vlastnosti zdroje podle aktuálních potřeb, což na komerčním výrobku nelze.
3. I když obdobný výrobek existuje, uživatel chce ušetřit tím, že neuvažuje cenu vlastní práce. Kromě toho chce získat teoretické i praktické zkušenosti ze speciální oblasti elektroniky.

Do posledních dvou kategorií patří i aktivita realizovaná v rámci této bakalářské práce.

Cílem bylo sestavit zdroj s běžnými parametry, ale vlastní prací a tím si mj. prakticky ověřit vlastní dovednost a znalosti získané během studia.

Jedná se o laboratorní napájecí zdroj pro méně náročné uživatele, kteří ocení nízkou pořizovací cenu a nebudou jim na závadu některé nepatrně horší parametry oproti komerčním přístrojům. Rozsah 30 V, který se jeví v porovnání s komerčními výrobky jako nejpoužívanější, bude dostatečný pro všechny běžné aplikace. Vyšší proud 3 A bude využit pouze ve speciálních případech, např. napájení výkonových stupňů zesilovačů, buzení elektromagnetů a speciálních aktuátorů.

Kapitoly práce obsahují obecný popis laboratorních zdrojů, významné použité součástky, elektrická schémata jednotlivých částí, desky plošných spojů, naměřené charakteristiky jako jsou výstupní zvlnění, zatěžovací charakteristiky, vliv změny sítě na výstupní napětí zdroje, skoková změna vnitřní odpor, funkce proudové pojistky atd.

1. SROVNÁNÍ LABORATORNÍCH ZDROJŮ

V této kapitole je uvedeno devět napájecích zdrojů, které budou následně porovnány v závislosti výkonu na pořizovací ceně.

1.1. Laboratorní zdroje s jednoduchou regulací

M10-SPM18-03E (obr.1)

regulace napětí 0-18V

regulace proudu 0-3A

cena 1979 Kč



Obrázek 1. – Zdroj **M10-SPM18-03E**

R124R50E výrobce DIAMETRAL (obr.2)

regulace napětí 0-24V

regulace proudu 0-2A

cena 2711 Kč

Indikace jedním přepínatelným (U/I) LED displejem.



Obrázek 2. – Zdroj **R124R50E**

LPS 30V/3A (obr.3)

regulace napětí 0-30V

regulace proudu 0-3A

cena 2799 Kč



Obrázek 3. – Zdroj **LPS 30V/3A**

Zdroj je odolný proti zkratu na výstupu a je vybaven dvěma digitálními měřidly, která umožňují současné odečítání momentální hodnoty proudu i napětí.

M10-SP305E (obr.4)

regulace napětí 0-30V

regulace proudu 0-5A

cena 3390 Kč



Obrázek 4. – Zdroj **M10-SP305E**

P130R51D-BL výrobce Diametral (obr.5)

regulace napětí 0-30V

regulace proudu 0-4A

cena 5055 Kč



Obrázek 5.- Zdroj **P130R51D-BL**

Zdroj obsahuje akustickou a optickou signalizaci proudového přetížení. Dále jemnou regulaci výstupního napětí, ochranu proti špičkám při zapnutí, proti přetížení a proti přehřátí automatickým chladicím ventilátorem.

V130R50D výrobce Diametral (obr.6)

regulace napětí 0-30V

regulace proudu 0-10A

cena 11662 Kč



Obrázek 6.- Zdroj **V130R50D**

Zdroj V130R50D se od zdroje P130R51D-BL liší pouze v rozsahu výstupního proudu.

1.2. Laboratorní zdroje s dvojitou regulací

M10-DP305E (obr.7)

regulace napětí 0-30V

regulace proudu 0-5A

cena 5990 Kč



Obrázek 7.- Zdroj **M10-DP305E**

P230R51D-BL výrobce Diametral (obr.8)

regulace napětí 0-30V

regulace proudu 0-4A

cena 8390 Kč



Obrázek 8.- Zdroj **P230R51D-BL**

Zdroj obsahuje akustickou a optickou signalizaci proudového přetížení. Dále jemnou regulaci výstupního napětí, ochranu proti špičkám při zapnutí, proti přetížení a proti přehřátí automatickým chladicím ventilátorem.

L240R51D výrobce Diametral (obr.9)

regulace napětí 0-40V

regulace proudu 0-3A

cena 8390 Kč



Obrázek 9.- Zdroj **L240R51D**

Oba nezávislé zdroje lze propojit stiskem tlačítka. 4x LED displej - měření U,I. Zdroj obsahuje akustickou a optickou signalizaci proudového přetížení. Dále jemnou regulaci výstupního napětí, ochranu proti špičkám při zapnutí, proti přetížení a proti přehřátí automatickým chladicím ventilátorem.

U všech výše uvedených zdrojů je uvedena typická katalogová hodnota zvlnění menší než 2 mV. Hodnota maximálního zvlnění nepřesahuje 10 mV. U výrobků značky Diametral je uvedena hodnota napěťové a proudové stability při změně sítě +6/-10 % přibližně 0,05 %.

Tabulka 1. – Katalogové hodnoty napájecích zdrojů

Laboratorní zdroje s jednoduchou regulací				
	cena [Kč]	rozsah napětí [V]	rozsah proudu [I]	P _{činný} [W]
M10-SPM18-03E	1979	18	3	54
R124R50E	2711	24	2	48
LPS 30V/3A	2799	30	3	90
M10-SP305E	3390	30	5	150
P130R51D-BL	5050	30	4	120
V130R50D	11662	30	10	300
Laboratorní zdroje s dvojitou regulací				
	cena [Kč]	rozsah napětí [V]	rozsah proudu [I]	P _{činný} [W]
M10-DP305E	5990	30	5	300
P230R51D-BL	8390	30	4	240
L240R51D	8390	40	3	240
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	1500	30	3,5	210

Závislost výkonu na ceně je znázorněno na (obr.10). Cenově nejvýhodnější se jeví zkonstruovaný zdroj bakalářské práce . Průměrná hodnota ceny za 1W činí 37Kč.



Obrázek 10. –Závislost výkonu na ceně

U uvedených výroků chybí důležité parametry jako jsou například vnitřní odpor zdroje, napěťová stabilita. Výrobce Diametral například uvádí graf typického zvlnění a odezvu na změnu zátěže. Naměřené grafy, které výrobce uvádí jsou nečitelné a navíc jsou použity pro všechny zdroje stejné. Srovnání laboratorních zdrojů firmy Diametral. (Tabulka 2.)

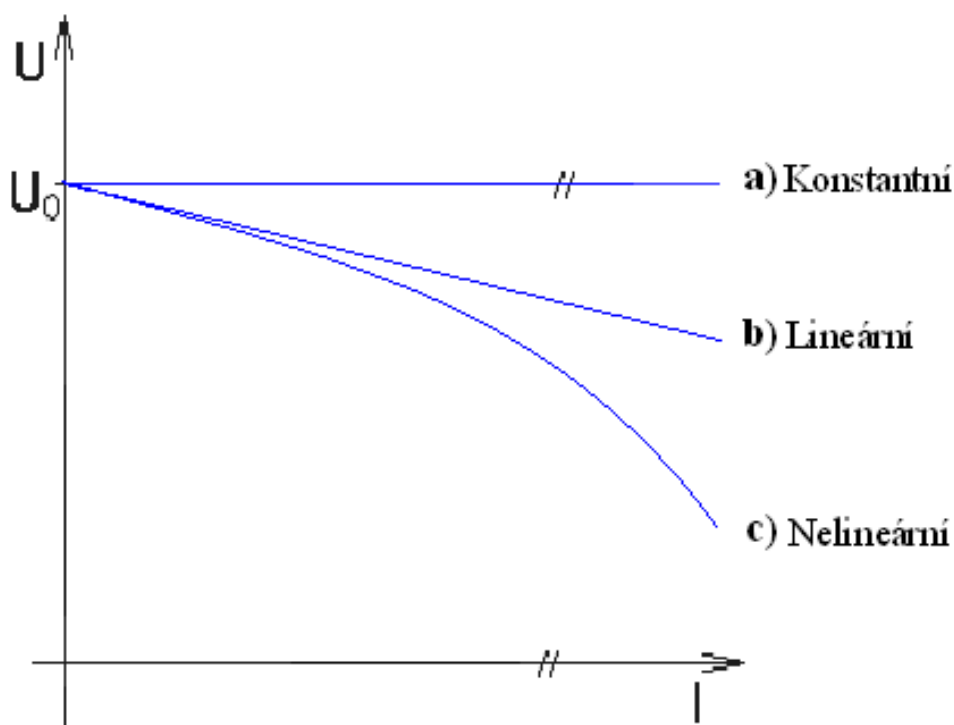
Tabulka 2. Parametry napájecích laboratorních zdrojů výrobce

parametr	P130R51D1	P230R51D	L140R51D	L240R51D	V130R50D	V140R50D	Q130R50D	M130R50D
napájecí napětí:	230V / 50Hz	230V / 50Hz	230V / 50Hz	230V / 50Hz	230V / 50Hz	230V / 50Hz	230V / 50Hz	230V / 50Hz
proud regulovatelný:	1x 0 ÷ 4A	2x 0 ÷ 4A	1x 0 ÷ 3A	2x 0 ÷ 3A	1x 0 ÷ 10A	1x 0 ÷ 10A	1x 0 ÷ 20A	1x 0 ÷ 40A
napětí pevné:	1x 5V	1x 5V	1x 5V	1x 5V	-	-	-	-
proud pevný:	1x 3A	1x 3A	1x 3A	1x 3A	-	-	-	-
zvlnění typické:	< 2mV	< 2mV	< 2mV	< 2mV	< 2mV	< 2mV	< 2mV	< 2mV
zvlnění maximální:	10mV	10mV	10mV	10mV	10mV	10mV	10mV	10mV
napěťová stabilita při změně sítě +6/-10 %:	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%
proudová stabilita při změně sítě +6/-10 %:	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%	cca 0,05%
typ měřicích přístrojů:	digital	digital	digital	digital	digital	digital	digital	digital
digital počet měřicích přístrojů:	2	4	2	4	2	2	2	2
třída přesnosti měřicích přístrojů:	2	2	2	2	2	2	2	2
indikace omezení proudu:	A / O	A / O	A / O	A / O	A / O	A / O	A / O	A / O
regulace hlasitosti akustické indikace:	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
možnost vypnutí akustické indikace:	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
blokování proti špičkám při startu:	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
samostatné vypínání výstupů:	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
spojení regulovatelných zdrojů do symetrického zdroje:	ne	ano	ne	ano	ne	ne	ne	ne
termostat chladičů s ventilátorem:	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
paměť stavu výstupu před vypnutím:	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano	ano
tepelná pojistka chladiče:	ne	ne	ne	ne	ne	ano	ano	ano
celkový příkon max.:	160W	320W	160W	320W	320W	660W	620W	2150W
barva:	černá / šedá	černá / šedá	černá	černá	černá	černá	černá	černá
rozměry (v, š, h - cca):	172 x 164 x 282mm	172 x 244 x 282mm	172 x 164 x 282mm	172 x 244 x 282mm	172 x 244 x 282mm	172 x 244 x 282mm	172 x 360 x 282mm	322 x 442 x 282
hmotnost cca:	6,8kg	10kg	6,8kg	10kg	10kg	10,3kg	19kg	26kg
záruka:	24 měsíců	24 měsíců	24 měsíců	24 měsíců	24 měsíců	24 měsíců	24 měsíců	24 měsíců

2. NAPÁJECÍ ZDROJE

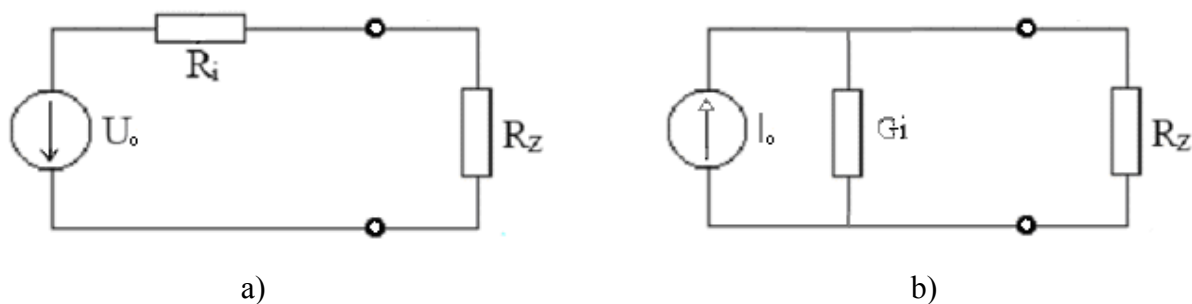
Stejnoseměrný napájecí zdroj je zařízení, které umožňuje zásobovat elektronické obvody stejnosměrným napětím při určitém odebíraném proudu. Musí tedy s určitou rezervou pokrývat výkonové požadavky napájeného zařízení. Výstupní napětí napájecího zdroje nemá kolísat se změnami zatěžovacího proudu, tj. ideální napájecí zdroj se má chovat jako ideální zdroj stejnosměrného napětí (obr.11 a)

Dělení zatěžovacích charakteristik



Obrázek 11. Zatěžovací charakteristiky zdroje a) Konstantní b) Lineární c) Nelineární

Reálný napájecí zdroj má však nenulový vnitřní odpor, který způsobuje pokles zatěžovací charakteristiky s rostoucím zatěžovacím proudem (obr.11 b). Vnitřní odpor zdroje se může se zatěžovacím proudem měnit, takže zatěžovací charakteristika skutečného napájecího zdroje nemusí mít bezpodmínečně tvar přímky.



Obrázek 12.- a)Zdroj napětí b)Zdroj proudu

V některých aplikacích je nastolen požadavek na zdroj konstantního proudu, který má za všech okolností do napájeného zařízení dodávat konstantní proud. To ovšem znamená, že napětí takového zdroje bude výrazně kolísat a jeho vnitřní odpor bude v ideálním případě $R_i \rightarrow \infty$. Napětí zdroje se proto musí blížit k nekonečnu jinak by netekl žádný proud. Pro zdroj proudu je nutné použít paralelní náhradní obvod.

2.1. Síťové zdroje stejnosměrného napětí

Síťové zdroje umožňují využití rozvodné sítě (většinou 230 V/50 Hz) pro napájení uvažovaných zařízení. Protože některá zařízení například zesilovače, předzesilovače, nabíječky, ochranné obvody, logické obvody atd. potřebují ke svému provozu určitá stejnosměrná napětí při určitém odběru, musejí síťové zdroje umožňovat zmenšení (případně zvětšení) střídavého napětí a jeho přeměnu na napětí stejnosměrné. Výstupní napětí nesmí vykazovat v ideálním případě žádné zvlnění, tj. nesmí obsahovat žádnou zbytkovou střídavou složku napětí.

Dobrý síťový napájecí zdroj se má chovat jako ideální zdroj napětí, tzn. jeho napětí se při změnách zatěžovacího proudu nesmí měnit, tj. zdroj má mít co nejmenší výstupní (vnitřní) odpor definovaný vztahem

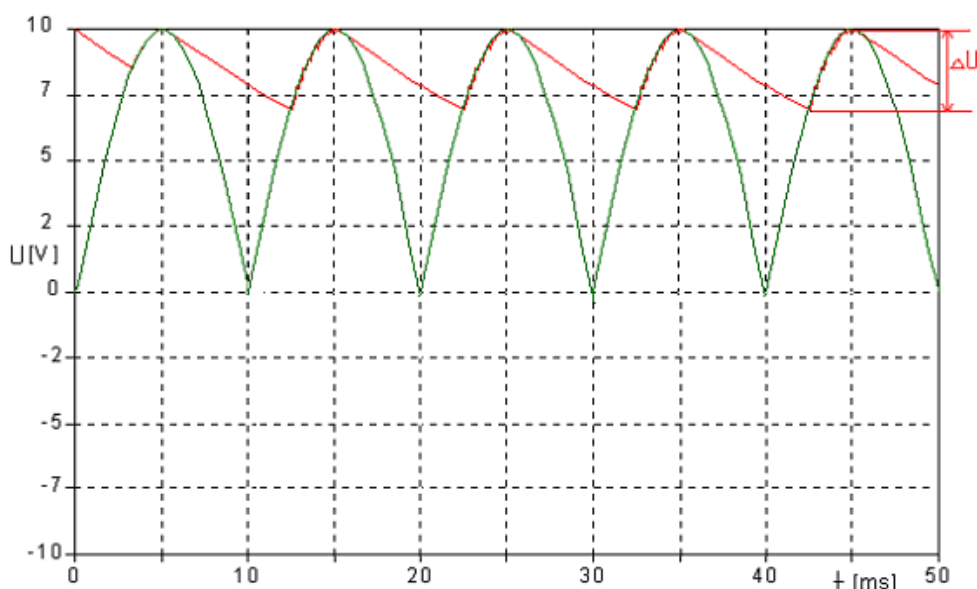
$$R_{výst} = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} \quad (1)$$

Kde ΔU_0 je změna výstupního stejnosměrného napětí při změně zatěžovacího proudu ΔI_0 .

Dále se požaduje co nejmenší zvlnění definované vztahem

$$\varphi_z = \frac{\Delta U}{U_0} \quad (2)$$

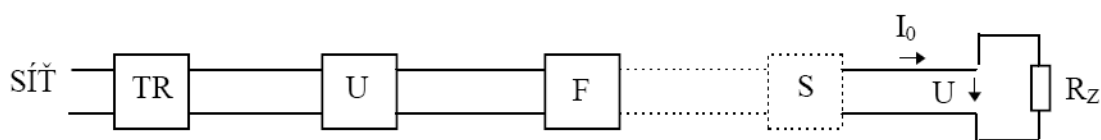
kde ΔU je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou výstupního napětí za jednu periodu, tj. jedná se o mezivrcholovou hodnotu zbytkové střídavé složky napětí (obr.13) a U_0 napětí naprázdno. Průběh zvlnění u jednocestného usměrňovače má zhruba tvar pily, u dvoucestného pak trojúhelníku. Červený průběh odpovídá zvlněnému napětí dvoucestného usměrňovače.



Obrázek 13.- Stejnoseměrné zvlněné napětí Grectzovo zapojení

2.2. Síťové zdroje klasické koncepce

Napájecí zdroj klasické koncepce (obr.14) obsahuje síťový transformátor TR, který upravuje velikost střídavého napětí na potřebnou hodnotu, usměrňovač U, který vytvoří ze střídavého napětí pulsující stejnosměrné napětí a vyhlazovací filtr F, který potlačí zvlnění výstupního stejnosměrného napětí zdroje na únosnou mez. Například nejlepší filtrace musí být u nízkofrekvenčních a stejnosměrných předzesilovačů, zpracovávajících velmi malý signál, horší filtrace postačuje u koncových stupňů, které pracují s velkým signálem. Pokud jsou na neměnnost a zvlnění výstupního napětí kladeny vyšší požadavky, bývá za vyhlazovací filtr zařazen spojitě, nebo nespojitě pracující stabilizátor stejnosměrného napětí S. Každý stabilizátor funguje zároveň jako vyhlazovací filtr, proto se v některých zapojeních, které využívají stabilizátoru S, vyhlazovací filtr F vynechává.



Obrázek 14. – Blokové schéma napájecího zdroje se spojitou regulací

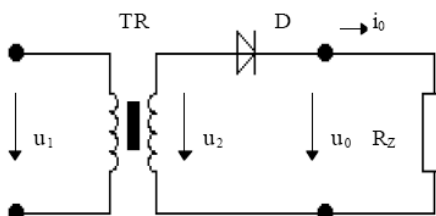
2.2.1. Sít'ový transformátor

Sít'ový transformátor umožňuje úpravu velikosti střídavého napětí při galvanickém oddělení od rozvodné sítě. Transformátor má jedno primární a jedno či více sekundárních vinutí. Vzniká tak možnost využití jednoho transformátoru pro větší počet usměrňovačů. Rozměry magnetického obvodu transformátoru volíme pro zvolenou hodnotu magnetické indukce podle přenášeného výkonu při uvažování účinnosti. U miniaturních transformátorů se zdánlivým výkonem do 3 VA je udávána relativně malá účinnost a to přibližně šedesát procent. U silových transformátorů je dosahována účinnost až 99 %. Maximální hodnota magnetické indukce B závisí na druhu, chemickém složení a zpracování magneticky měkkého materiálu jádra transformátoru. Pro neorientované transformátorové oceli pro plechy EI, M bývá 1,2 až 1,3 T. Pro orientované transformátorové oceli jádra typu C a Q pak 1,6 až 1,7 T. Vodiče jednotlivých vinutí transformátoru mají průřez podle procházejícího proudu a dovoleného oteplení vinutí. Proudová hustota ve vinutích bývá 2,5 až 4 A/mm². Při návrhu sít'ového transformátoru si musíme uvědomit, že hodnota vyhlazeného usměrněného napětí vzroste přibližně na 1,4 násobek. V úvahu musíme vzít i úbytek na diodách, který je přibližně 0,7 V.

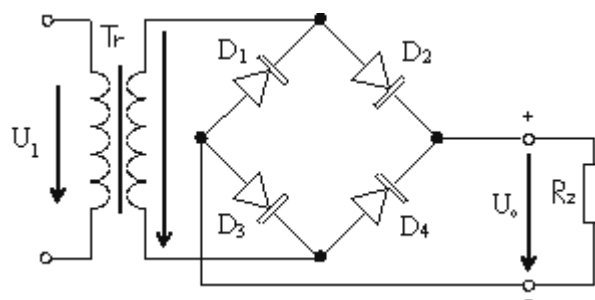
2.2.2. Usměrňovač

Vlastní usměrňovací prvek je v podstatě ventil, který propouští proud jedním směrem. Ve většině případů je tvořen diodou nebo vhodným uspořádáním diod. Jinou možností je užití řízených usměrňovačů například tyristorů, spínacích bipolárních tranzistorů.

Při návrhu usměrňovače musíme zahrnout úbytek na diodě, který je přibližně 0,7 V. Usměrňovač může být zapojen jako jednocestný (obr.15), nebo dvoucestný. Nejpoužívanější je však usměrňovač můstkový, který je tvořen čtyřmi polovodičovými diodami uspořádanými do můstku, tzv. Graetzovo zapojení (obr.16).



Obrázek 15. – Jednocestný usměrňovač

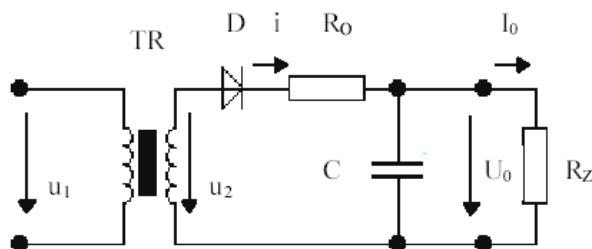


Obrázek 16. Dvoucestný usměrňovač Greatzovo zapojení

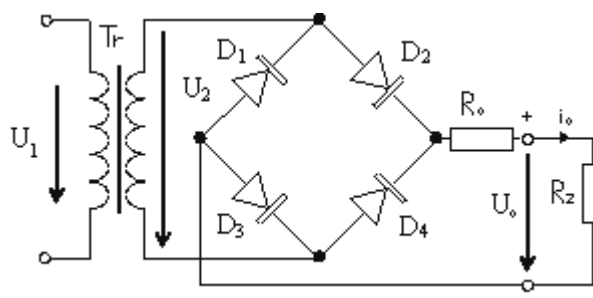
Výstup usměrňovače může být buď bez zásobníku energie, nebo s výstupním kondenzátorem či výstupní tlumivkou. Tlumivka se používá jen zřídka, jelikož je drahá a její rozměry jsou příliš veliké. V dnešní době se snaží výrobci o co nejmenší možné rozměry zařízení.

2.2.3. Usměrňovač s kapacitním výstupem

Jednocestný (obr.17), nebo dvoucestný (obr.18) usměrňovač se sběracím kondenzátorem ve funkci zásobníku energie pracuje tak, že přes diodu (diody) se pulsujícím proudem nabíjí kondenzátor, na němž se díky jeho akumulačním schopnostem objevuje stejnosměrné zvlněné napětí. Zvlnění tohoto napětí závisí na velikosti kapacity kondenzátoru a na zatěžovacím odporu R_z . Čím má kondenzátor větší kapacitu C a čím je zatěžovací odpor R_z větší, tím se kondenzátor v době, kdy diody nevedou, méně vybíjí a výstupní napětí má menší zvlnění. Rezistor R_0 má ochranou funkci, neboť omezuje nabíjecí proud kondenzátoru v okamžiku zapnutí zdroje, kdy je na kondenzátoru nulové napětí. Svou přítomností ovlivňuje v ustáleném stavu odpor fáze R_f a tím i šířku a velikost proudových impulzů, jež nabíjejí kondenzátor C .



Obrázek 17. – Jednocestný usměrňovač s kapacitním výstupem



Obrázek 18. – Dvoucestný usměrňovač s kapacitním výstupem

2.3. Spínané síťové zdroje

Spínané zdroje využívají střídačů s bipolárními nebo unipolárními tranzistory, které pracují na relativně vysoké frekvenci až stovek kHz. Střídače jsou řízeny nespojitě pracující zpětnou vazbou, ovlivňující šířku budících impulsů spínačů, jež má stabilizující účinek na výstupní napětí. Tím je účinnost spínaných zdrojů podstatně vyšší než u klasických spojitě regulovaných stabilizovaných zdrojů. S využitím vyšších frekvencí však nastává problém ztrát za použití magnetických obvodů. Dále nastává problém s usměrněním střídavého napětí. Používají se buď rychlé diody, například Schottkyho, nebo spínací unipolární tranzistory při synchronním usměrnění. Střídač s usměrňovačem se souhrnně nazývá měnič.

Dále bude doba sepnutí spínače střídače označena symbolem T_a , doba rozepnutí T_b a celková perioda T_c . Platí $T_c = T_a + T_b$ (3)

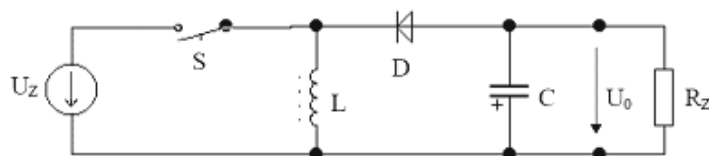
Převrácená hodnota celkové periody se nazývá pracovní frekvence střídače

2.4. Měníče impulsně regulovatelného zdroje

Podle toho, ve kterém časovém období je energie dodávána na výstup zdroje, rozeznáváme měniče blokující a propustné. Kromě těchto nejjednodušších mohou být měniče kombinované, vícenásobné nebo dvojčinné. Jiným rozdělením může být dělení na měniče, které výstupní napětí oproti vstupnímu snižují nebo zvyšují.

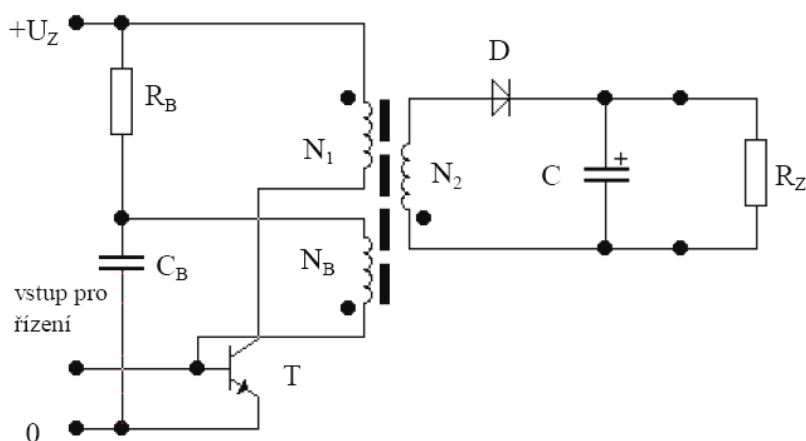
2.4.1. Blokující měnič

V základním zapojení využívá měnič akumulaci tlumivky, v níž se hromadí energie po dobu T_a a po dobu T_b se převádí přes usměrňovač do výstupního obvodu (obr.19). Spínací prvek na obrázku je nahrazen spínačem S.



Obrázek 19. – Blokující měnič

Skutečný měnič má impulsní transformátor s určitým ohmickým odporem, takže proud nenarůstá ani neklesá přesně lineárně. U skutečného měniče vlivem pomalosti usměrňovacích prvků na sekundární straně impulsního transformátoru (u diod vlivem zbytkového náboje na kapacitě přechodu PN) dochází k určitému zpoždění přenosu energie do zátěže. V okamžiku ukončení intervalu T_a je skutečná cívka odtlumena a funguje spolu s parazitními kapacitami jako rezonanční obvod, který vlivem nahromaděné energie generuje řadu zákmitů na vlastní rezonanční frekvenci. Tyto zákmity musejí být účinně utlumeny pomocným obvodem D,R,C například (obr.20).



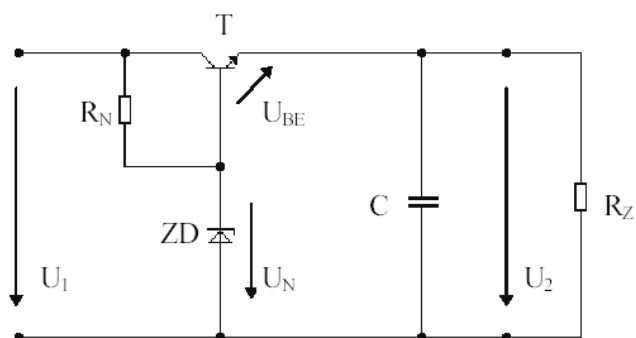
Obrázek 20. – Pomocný útlumový obvod D,R,C

2.5. Sériové stabilizátory s neregulovatelným a regulovatelným napětím

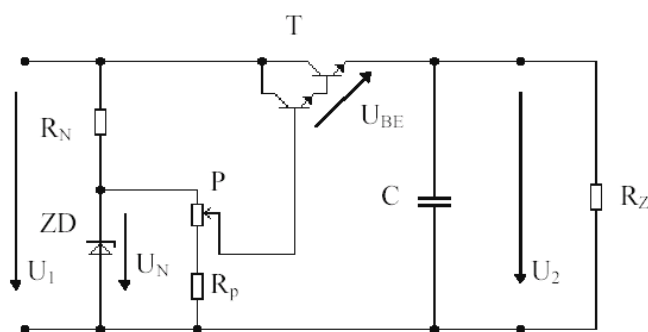
Obrázek 21a. a 21b. ukazuje nejjednodušší zapojení sériového stabilizátoru s neregulovatelným a regulovatelným výstupním napětím. Zřejmě platí: $U_2 = U_1 - U_{CE}$ (4), přičemž $U_2 = U_N - U_{BE}$. (5)

Výstupní napětí je tedy určeno napětím U_N Zenerovy diody, oproti němu je zhruba o 0,7 až 0,8 V U_{BE} křemíkového tranzistoru menší podle velikosti proudu I_2 . Požadujeme-li regulovatelné výstupní napětí, použijeme k regulaci potenciometru, který ovšem podstatně zhoršuje p_U a $R_{výst}$ stabilizátoru. Zenerova dioda by neměla být zatěžována, tj. potenciometr by měl mít velkou hodnotu odporu; potom by však

tranzistor musel mít mizivě malý proud báze I_B , takže použití Darlingtonovy dvojice se stává nutností. Zenerova dioda by měla být blokována kondenzátorem s ohledem na velké šumové napětí.

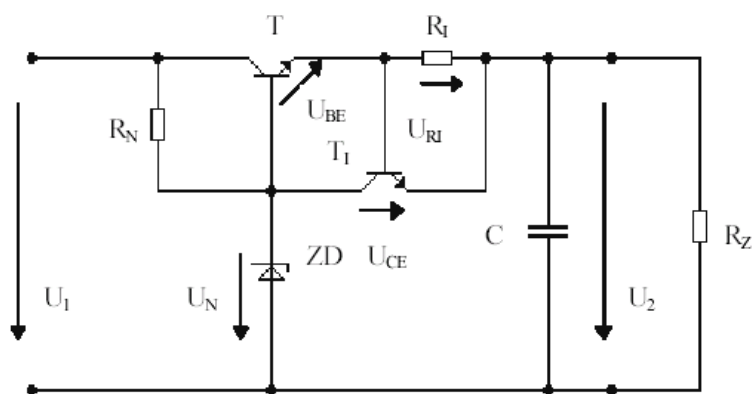


Obrázek 21 a.- Sériový stabilizátor s neregulovatelným výstupním napětím



Obrázek 21 b.- Sériový stabilizátor s regulovatelným výstupním napětím

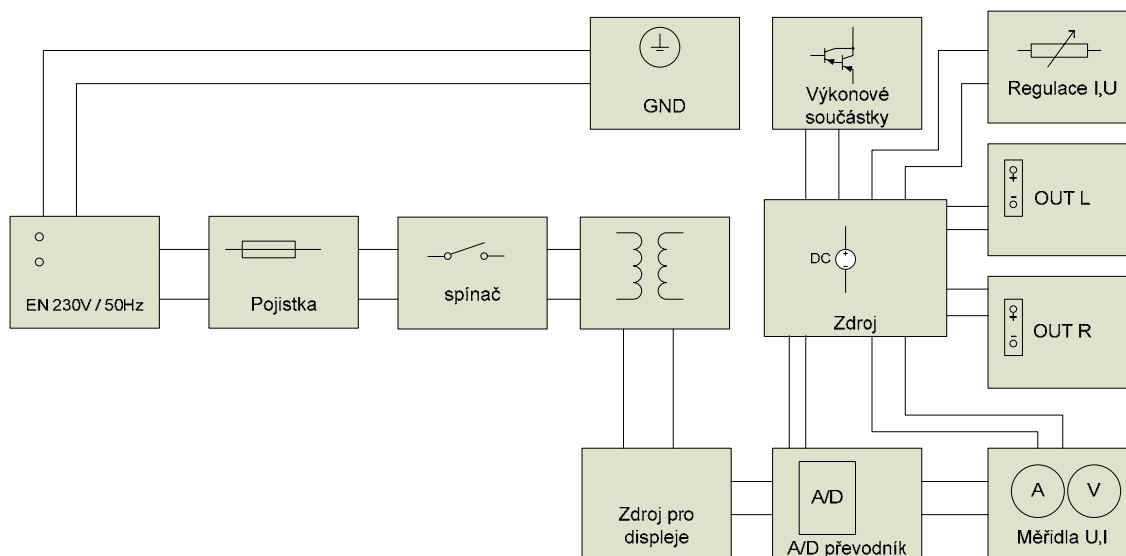
Obvod proudové ochrany omezením výstupního proudu typu fold back (obr.22) notně zvyšuje vnitřní odpor výše uvedeného stabilizátoru. Se vzrůstajícím zatěžovacím proudem roste úbytek napětí na rezistoru R_I . Pokud proud přestoupí maximální povolenou hodnotu, vzroste úbytek napětí natolik, že se začne otevírat pomocný tranzistor T_I , který převede část proudu z obvodu báze tranzistoru T na výstup stabilizátoru, čímž stabilizátor přejde do režimu konstantního výstupního proudu.



Obrázek 22.- Sériový stabilizátor s omezením výstupního proudu

3. KONSTRUKCE ZDROJE

Před skutečnou realizací bylo rozhodováno mezi napájecím zdroje klasické koncepce a spínaným zdrojem. Po zjištění problematik se spínaným zdrojem jako je například vyšší vyzařování a hlavně nedostupnost použitých součástek byla zvolena realizace laboratorního napájecího zdroje s toroidním transformátorem a osvědčeným obvodem MAA 723, který je bezpečně schopen splnit zadání bakalářské práce. Pro napájení displeje napětí a proudu je použit obvod ICL 7107 za použití zapojení výrobce.



Obrázek 23.- Blokové schéma laboratorního zdroje

Blokové schéma (obr. 23) v sobě zahrnuje všechny funkční součásti zdroje. Zcela vlevo je přívod síťového napětí 230 V / 50 Hz, z kterého se dělí vodiče na kostru přístroje a zemnicí svorku (GND) a na pojistku. Z pojistky je napětí přivedeno na dvoupólový kolébkový spínač a následuje transformátor. První sekundární vinutí transformátoru je vedeno k desce zdroje, druhé na pomocný zdroj. K základní desce zdroje jsou připojeny výkonové tranzistory, regulační prvky napětí a proudu a výstupní svorky. Za pomocným zdrojem následují desky s A/D převodníky a zobrazovací jednotka. Mezi hlavním zdrojem a A/D převodníky a taktéž mezi hlavním zdrojem a zobrazovací částí jsou vodiče pro vyhodnocování informací o napětí a proudu.

Zdroj se skládá z usměrňovače, filtrace, stabilizace napětí a proudové ochrany. Usměrňovač je tvořen 4 křemíkovými diodami. Za usměrňovačem jsou zapojeny vyhlazovací kondenzátory s kapacitou 2200 μF . Kondenzátory svou velkou kapacitou zaručují dostatečné vyfiltrování usměrňovaného napětí od síťového brumu. V zapojení je připojen keramický kondenzátor 100 nF, který zajišťuje odstranění šumu. Dále následuje stabilizátor, který tvoří integrovaný obvod (IO MAA723). V obvodu je obsažen regulátor napětí i proudové omezení. Tranzistory T_{1a} a T_{1b} a T_2 zajišťují vlastní výkonovou regulaci. Na tranzistorech T_{1a} a T_{1b} zůstává téměř všechen ztrátový výkon. Tranzistory je zapotřebí chladit dostatečně velkým, dimenzovaným chladičem. K regulaci napětí slouží potenciometr P_2 a napětí je snímáno z výstupní svorky. Na rezistoru R_{17} se měří úbytek napětí, který je vyvolán průchodem výstupního proudu. Proudová ochrana reaguje v případě, kdy se na rezistoru R_{17} objeví napětí přibližně 0,6 V. Tranzistory T_3 a T_4 s diodou Q_7 složí k indikaci činnosti proudové ochrany. V našem případě pojistky. Okamžik, kdy se má dioda Q_7 rozsvítit lze nastavit trimrem R_{36} . Dioda D_8 složí k ochraně zdroje před napětíovými špičkami, které vznikají připojením indukční zátěže například elektromotoru, relé, apod.

3.1. Zobrazovací část

Zobrazovací část je tvořena měřidlem proudu a měřidlem napětí. Obě části jsou téměř shodné a liší se v připojení vstupního děliče, desetinné a setinné tečky. Měřidlo napětí obsahuje vstupní body připojené na výstupní svorky zdroje. Měřidlo proudu je připojeno na snímací rezistor R_{17} , na kterém vzniká potřebný úbytek napětí. Měřidla se skládají z integrovaného obvodu ICL7107, který v sobě sdružuje 3 1/2 místný osmibitový A/D převodník a dekodér pro sedmisegmentový LED displej se společnou anodou.

3.2. Popis významných použitých součástek

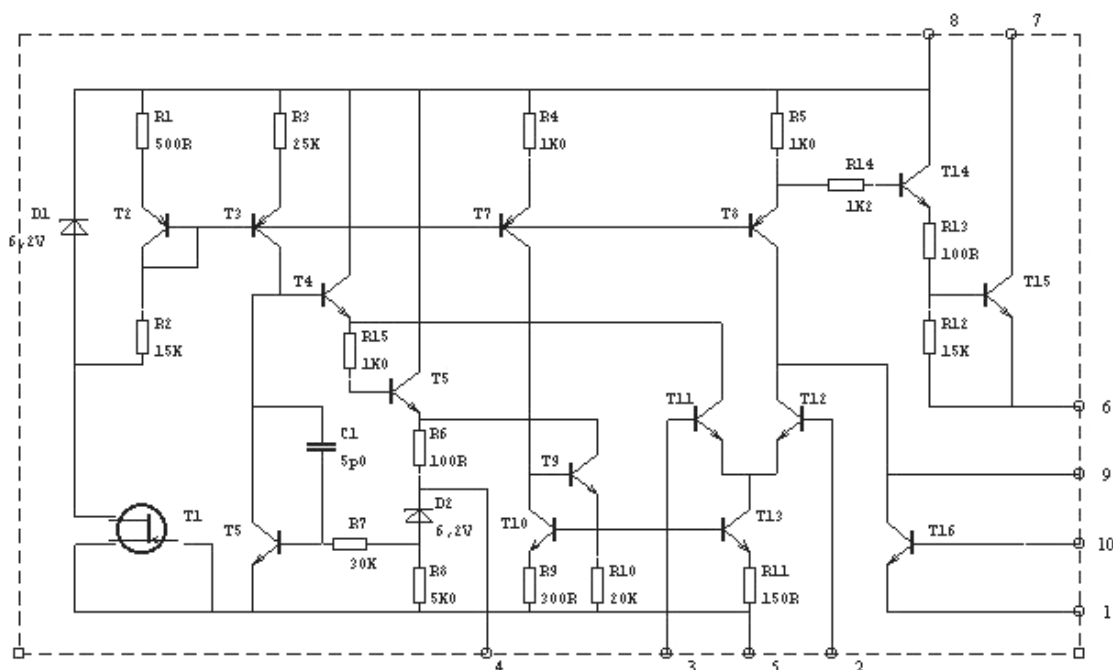
V této kapitole se zmíním o integrovaném obvodu MAA 723 a ICL 7107

3.2.1. Integrovaný obvod MAA 723

Integrovaný obvod řady 723 poprvé představila firma Fairchild v sedmdesátých letech minulého století pod označením μA 723. Tento obvod se pro svoji relativní jednoduchost a především spolehlivost stal používaným v celé řadě aplikací. Obvod se nejprve vyráběl v kovovém kulatém pouzdru TO-5, později byl přenesen do pouzdra DIL14.

Integrovaný obvod MAA 723 v sobě sdružuje přesný sériový stabilizátor napětí a pojistku typu fold-back (proudové omezení). Obvod je vyroben planárně epitaxní technologií na křemíkovém základu. Rozsah provozních teplot je limitován hodnotami $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vnitřní zapojení desetivývodového obvodu včetně hodnot jednotlivých součástek (obr. 24)

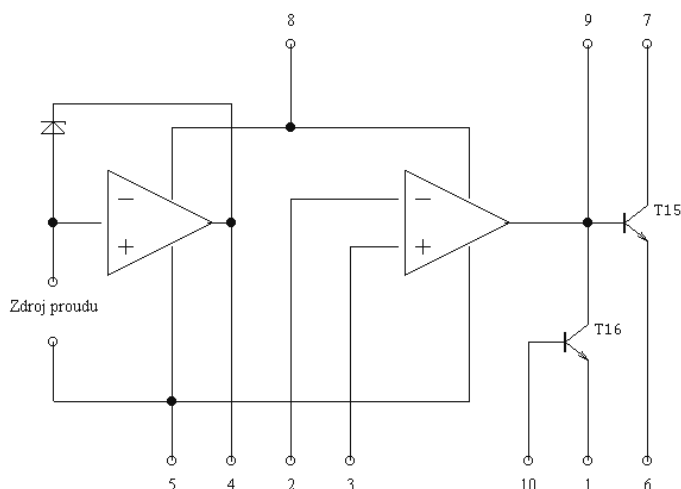


Obrázek 24. – Vnitřní zapojení desetivývodového obvodu MAA 723

Základní činnost obvodu lze vysvětlit na zjednodušeném zapojení. Jedná opět o desetivývodové zapojení (obr. 25)

Vývody:

- 1 – proudová pojistka
- 2 – invertující vstup OZ
- 3 – neinvertující vstup OZ
- 4 – výstup referenčního napětí
- 5 – zem (nejzápornější napětí OZ)
- 6 – výstupní stabilizované napětí
- 7 – vstupní napětí
- 8 – napájení IO
- 9 – frekvenční kompenzace
- 10 – proudová pojistka



Obrázek 25. – Desetivývodové zapojení IO MAA723

Vývody 8,7 a 5 slouží pro přivedení vstupního usměrněného napájecího napětí. Základní obvod s vývodem 4 je zesilovač referenčního stabilizovaného napětí U_R . Referenční napětí je vytvářeno teplotně kompenzovanou stabilizační Zenerovou diodou ve zpětné vazbě zesilovače a jeho typická hodnota je $U_R = 7,15 \text{ V}$. Toto referenční napětí se buď přímo, nebo přes odporový dělič přivádí na jeden ze vstupů (2 nebo 3) rozdílového zesilovače. Na druhý vstup zesilovače se přivádí vhodné výstupní napětí, které je na výstupu 6. Rozdílový zesilovač tedy udržuje stejné napětí na obou svých vstupech. Zmenší-li se výstupní napětí například vlivem zatížení stabilizátoru, přenesse se tato změna napětí na jeden ze vstupů zesilovače. Zesilovač porovná napětí s referenčním napětím a přes výstupní tranzistor T_{15} dostaví výstupní napětí zpět na původní hodnotu. Tranzistor T_{16} má vyvedenou bázi a emitor, mezi které se připojuje rezistor s větším odporem, jímž prochází výstupní proud. Při překročení určité hodnoty výstupního proudu se vytvoří na tomto odporu úbytek napětí, který otevře tranzistor T_{16} . Kolektor tranzistoru T_{16} je spojen s bází tranzistoru T_{15} , sníží se výstupní napětí na výstupu 6 až na nulu. Výstup 9 slouží k frekvenční kompenzaci obvodu.

V konstrukci práce je použit novější obvod a to v provedení se čtrnácti vývody. Označení jednotlivých vývodů (obr. 26)

Vývody:

1. nezapojen
2. proudové omezení
3. proudová kontrola
4. invertující vstup
5. neinvertující vstup
6. referenční napětí
7. zem
8. nezapojen
9. výstup přes Zenerovu diodu
10. výstupní stabilizované napětí
11. napájení výstupního tranzistoru
12. napájení IO
13. kmitočtová kompenzace
14. nezapojen

1	NC	NC	14
2	IOM	COMP	13
3	ICONTR	UI+	12
4	IN-	U2+	11
5	IN+	UO	10
6	U REF	UOZ	9
7	GND	NC	8

Obrázek 26.-Pouzdro IO MAA 723 se čtrnácti vývody

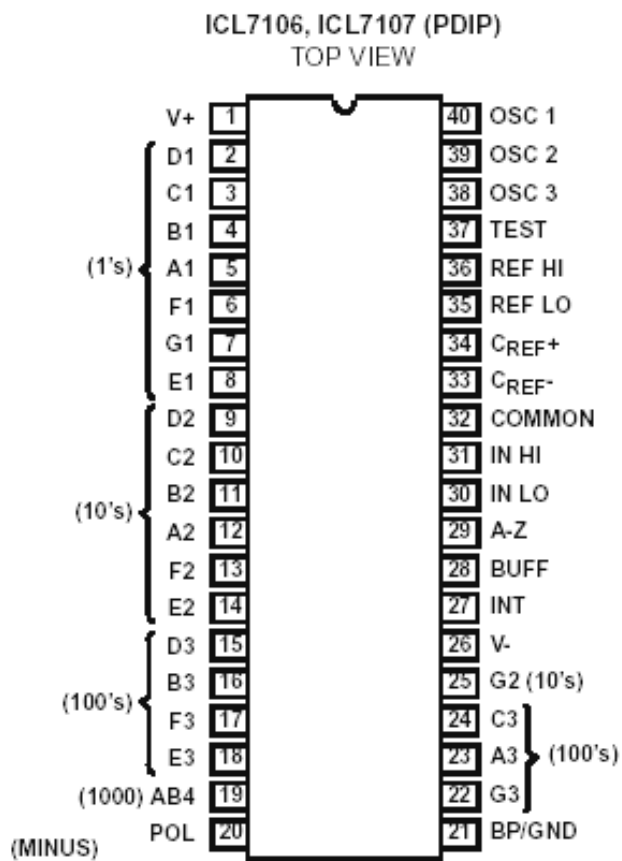
3.2.2. Některé charakteristické údaje

Rozsah vstupního napájecího napětí:	$U_1 = 9,5 \div 40 \text{ V}$
Rozdíl mezi vst. a výst. napětím:	$U_2 - U_1 = 3 \div 38 \text{ V}$
Maximální výstupní proud:	$I_{2\max} = 150 \text{ mA}$
Referenční napětí:	$U_{\text{ref}} = 6,95 \div 7,35 \text{ V}$

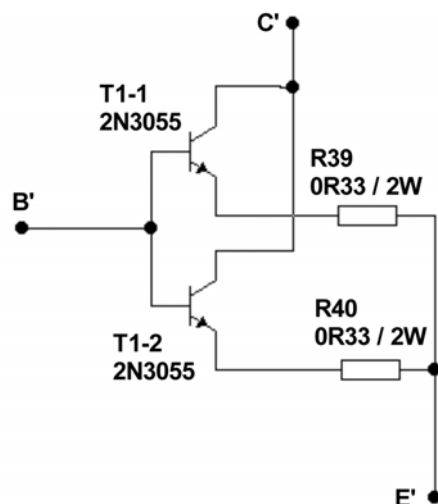
3.2.3. Integrovaný obvod ICL 7107

Kompletem měřidel napětí a proudu je dvojice integrovaných obvodů ICL 7107. Jedná se o klasické analogově digitální převodníky s dekodérem pro trojmístné sedmisegmentové LED zobrazovače se společnou anodou. Mohou být použity jako základní prvek pro voltmetry, ampérmetry, ohmmetry, teploměry a všude tam, kde lze měřenou veličinu převádět na napětí. Nevýhodou je poměrně značný proudový odběr, přesahující 180mA. Z tohoto důvodu se používá pro zařízení napájené síťovým zdrojem. V zapojení je použito doporučené schéma výrobce, přičemž snímání napětí pro voltmetr je provedeno přímo na výstupních svorkách zdroje a snímání proudu pro ampérmetr se děje pomocí snímacího rezistoru, na kterém vzniká potřebný úbytek

napětí. To je nutné z hlediska toho, že obvod umí převádět pouze napětí. Detailní rozpis vývodů převodníku ICL 7107 ukazuje následující obrázek (obr. 27).



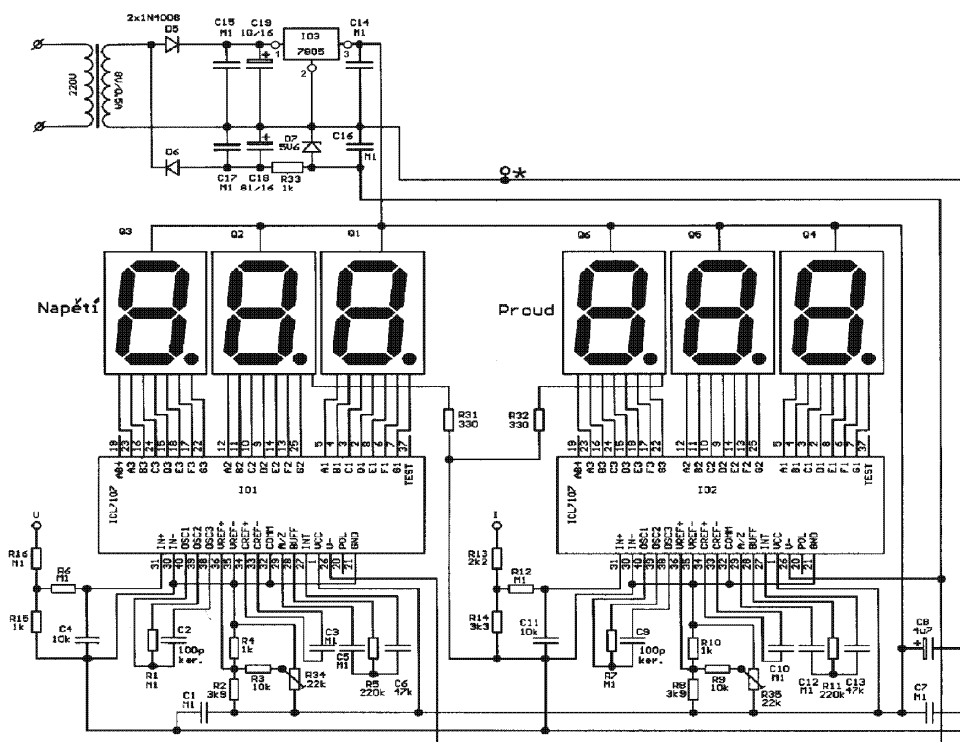
Obrázek 27. – A/D převodník ICL 7107



Obrázek 29. – Zdvojení výkonového tranzistoru

4.2. Elektrické schéma A/D převodníku a zobrazovací jednotky,

Elektrické schéma pomocného zdroje (ten je z důvodu potřeby symetrického napájení $\pm 5V$ řešen jako zdvojevač), analogově digitálních převodníků a na ně navazujících zobrazovacích jednotek (obr. 30)



Obrázek 30. – Elektrické schéma zobrazovací jednotky

5. POZNÁMKY K CHLAZENÍ, NASTAVENÍ MĚŘIDEL

Celé zařízení je umístěno v kovové přístrojové skříni složené ze dvou, U-dílů. Tepelně namáhané tranzistory jsou umístěny na chladičích. Tranzistory T1-1,2 jsou umístěny na zadní části skříně, od tranzistorů je chladič odizolován pomocí slídových podložek pro pouzdro TO3 a plastových podložek určených pro tento typ tranzistoru. Desky plošných spojů jsou jednovrstvé. Tranzistor T1-1,2, T2 regulace napětí, proudu a výstupní svorky jsou propojeny mezi deskami vodičem. Přivedené napětí do zdroje signalizuje síťový spínač, který po zapnutí svítí zeleně.

V následujícím článku popíšu postup oživení regulovatelného napájecího zdroje. Po zkontrolování hodnot součástek a osazení jednotlivých desek, jsem nejprve naměřil správné hodnoty transformátoru. Následně jsem zapojil pomocný zdroj a změřil hodnotu výstupního napětí pomocí voltmetru cca ± 5 V, připojil jsem výkonovou část, která fungovala podle předpokladů dobře. Připojil jsem displeje napětí a proudu a nastavil jejich hodnoty s pomocí voltmetru a ampérmetru. Trimrem jsem nastavil měřidlo napětí a proudu. Nastavení je velice jednoduché: Připojíme kalibrační voltmetr, potenciometr P2 vytočíme doprava (regulace proudu). Trimrem R34 nastavíme referenční napětí pro IO1 tak, aby údaj na displeji odpovídal na kalibračním voltmetru. Při nastavování měřidla proudu připojíme na výstupní svorky zdroje do série s kalibračním ampérmetrem ochranný rezistor (například 8 Ω). Potenciometr P1 vytočíme doprava na maximum a trimrem R35 nastavíme referenční napětí pro IO2 tak, aby údaj na displeji odpovídal kalibračnímu ampérmetru. Posledním krokem je nastavení pojistky proudového omezení. Na zdroj připojíme zátěž (opět například 8 Ω , rezistor musí mít takový odpor, aby při maximálním napětí 30 V jím procházel proud 3 A) v sérii s ampérmetrem. Potenciometr P2 vytočíme na maximum, potenciometr P1 nastavíme na nejmenší proud a trimrem R38 nastavíme dolní mez proudového omezení 200 mA. Při nastavování horní meze proudového omezení potenciometr P1 vytočíme na maximální proud a trimrem R37 nastavíme proud 3,5 A. Nastavení je třeba několikrát zopakovat, neboť trimry se vzájemně ovlivňují. Při požadavku na dlouhodobou přesnost nastavení dolní hranice proudového omezení je vhodné trimr R38 nahradit vhodnou kombinací rezistorů s pevnými odpory. Trimrem R36 nastavíme okamžik rozsvícení indikační diody Q7 tak, aby byl shodný s okamžikem, kdy začíná reagovat proudové omezení. Stejně nastavení první výkonové desky jsem zopakoval i na druhé.

Obsluha přístroje nevyžaduje zvláštní nároky. Funkce jednotlivých svorek a regulačních prvků jsou zřejmé z popisků na předním panelu.

5.1. Výpočet chlazení výkonové části

Pro výkonové tranzistory jsem zvolil chladič podle zjednodušeného výpočtu. Jelikož u napájecího zdroje není přepínatelné vinutí, je zde velká výkonová ztráta, která se blíží až k 90 W. Jelikož napájecí zdroj má dva výstupy oproti původnímu zadání není možné chladit takto velkou výkonovou ztrátu obou výstupů najednou. Oba výstupy je možné použít pouze při menších odběrech.

Pro výpočet chladiče je nutné počítat s maximálním rozdílem napětí (vzorec 6.)

$$P_{V_{MAX}} = (U_{VST} - U_{VYST}) \cdot I_{MAX} \quad (6)$$

$$P_{V_{MAX}} = (30 - 1) \cdot 3 = 87W$$

Výkon z tranzistoru je přes pouzdro tranzistoru a izolační podložku převeden do chladiče (vzorec 7.) kde ϑ_{MAX} je teplota na pouzdru a ϑ_{MIN} teplota na chladiči.

$$R_{\vartheta_{CELK}} = \frac{\vartheta_{MAX} - \vartheta_{MIN}}{P_{V_{MAX}}} \quad (7)$$

$$R_{\vartheta_{CELK}} = \frac{130 - 35}{87} = 1,09 \frac{K}{W}$$

Vzorec 8.- Výkon tranzistoru

Tepelný odpor přechodu není v katalogu uveden, můžeme proto vycházet pouze z přibližných hodnot 0,4-0,9 K/W.

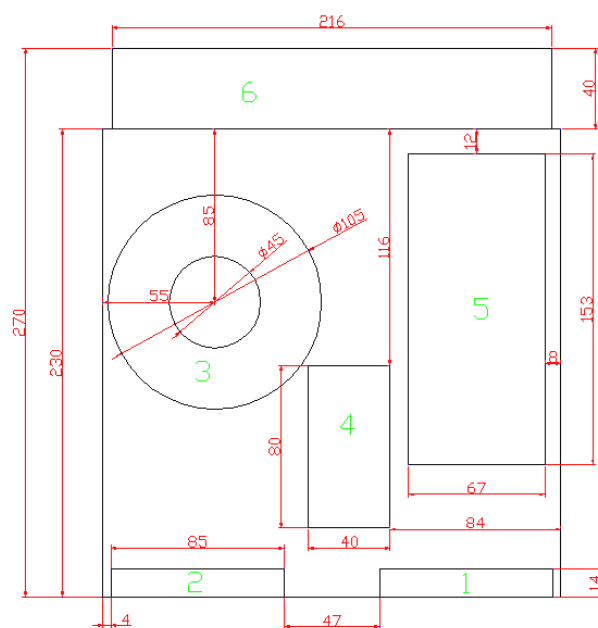
Tepelný odpor chladiče má podle katalogu hodnotu 0,8 K/W.

Ostatní součástky jsou chlazeny doporučeným chladičem výrobců.

6. KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ ZDROJE

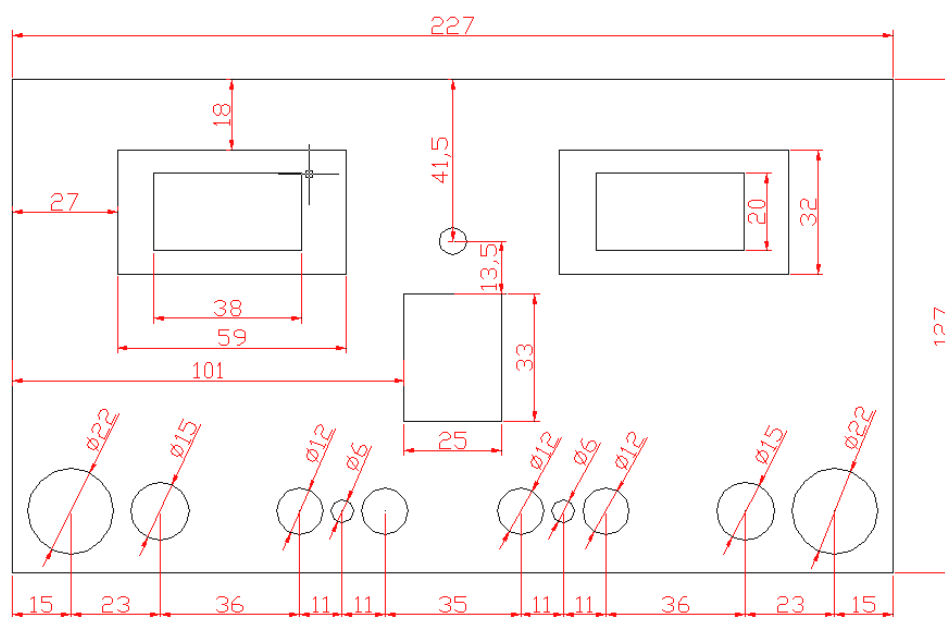
legenda:

- 1- ukazatel proudu
- 2- ukazatel napětí
- 3- toroidní transformátor
- 4- pomocný zdroj pro měřidla
- 5- deska s výkonovou částí (dvě nad sebou shodné desky)
- 6- chladič



Obrázek 31.-Konstrukční uspořádání zdroje

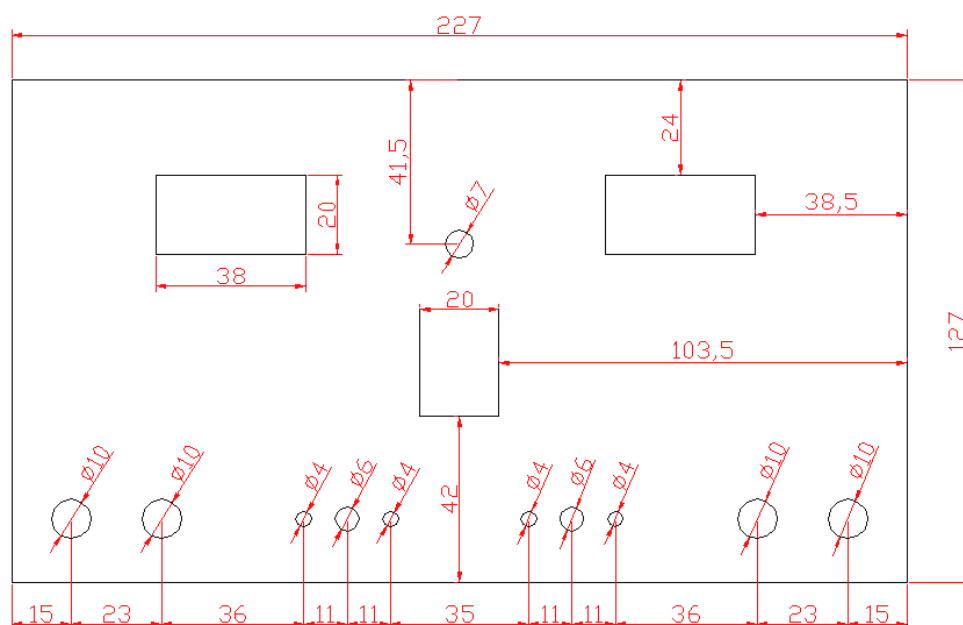
6.1. Výkres předního panelu s uspořádáním jednotlivých prvků



Obrázek 32.-Výkres předního panelu

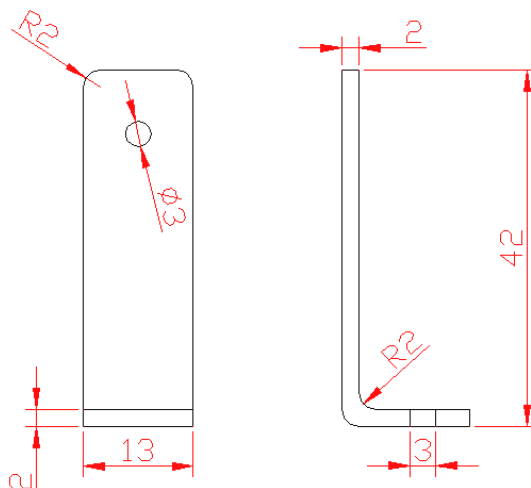
Přední a zadní panel jsem popsal syntetickou barvou (barva žluto-zlatá) Popisky byly nejprve vyřezány do samolepící fólie, později nalepeny a nakonec, „vytupovány“. Rozmístění neuvedeno.

6.2. Mechanické uspořádání předního panelu



Obrázek 33-Výkres předního panelu

6.3. Ostatní mechanické prvky



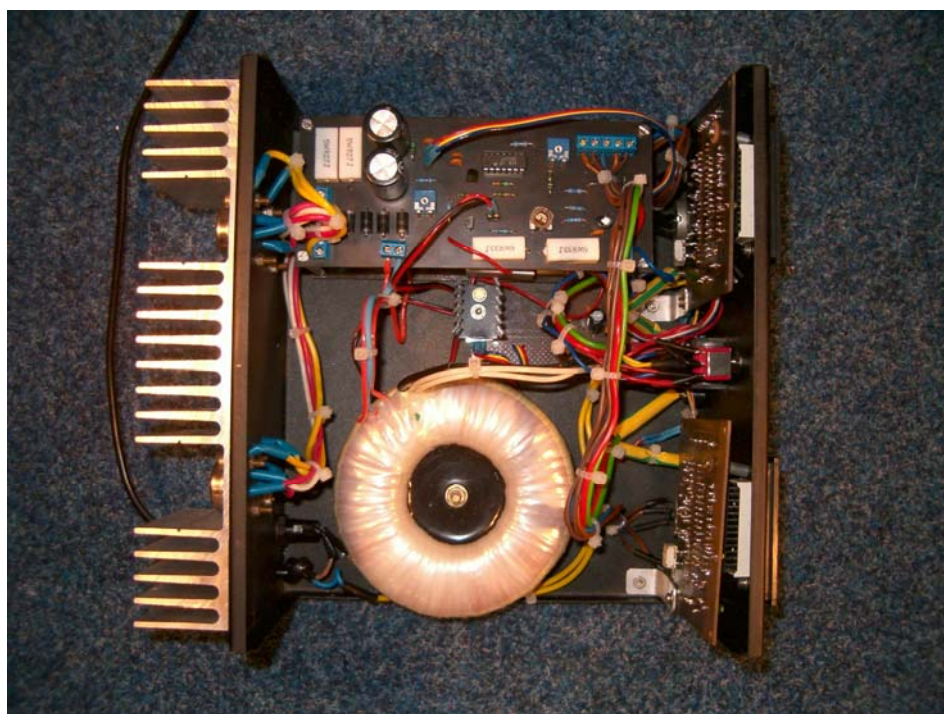
Obrázek 34- Úhelník pro přichycení displejů

Úhelníky jsou vyrobeny z hliníku tloušťky 2 mm, při výrobě nebylo dbáno na přesnost, jelikož zde slouží pouze pro připevnění měřidel.

7. FINÁLNÍ PODOBA NAPÁJECÍHO ZDROJE



Obrázek 35.- Čelní pohled zdroje



Obrázek 36.- Pohled shora

8. POČÍTAČOVÁ KARTA PCI-1711

Jedná se o počítačovou kartu, kterou lze využít pro komunikaci s napájecím zdrojem. Karta obsahuje v interním zapojení dva výstupy napětí v rozsahu $0 \div 5$ V nebo $0 \div 10$ V, které jsou regulovatelné.

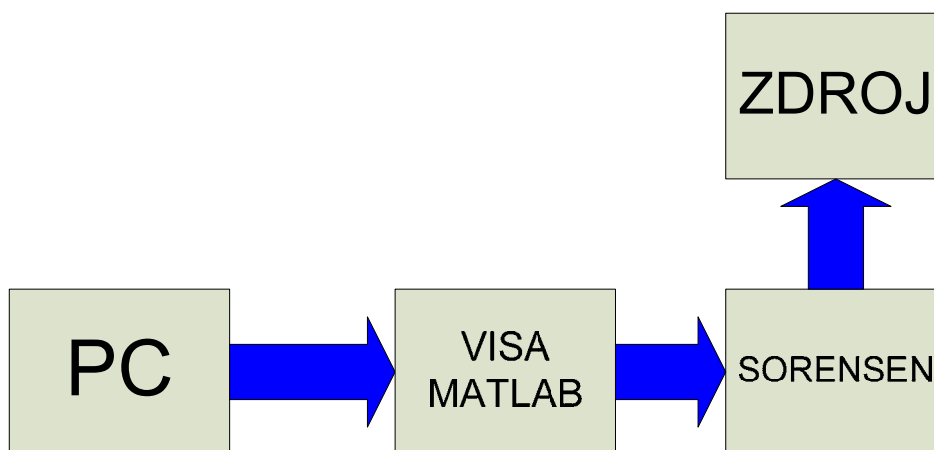
Řízení výstupního napětí napájecího zdroje kartou PCI-1711 je možné pouze v případě, že se bude jednat o napěťově řízený zdroj. Při realizování zdroje bakalářské práce se postupovalo dle zadání podle bodu jedna. Po zrealizování zdroje se přistoupilo k bodu 2,3,4. Pokus o komunikaci zdroje s rozhraním USB či staršího RS232 není možný, jelikož zapojení obvodu MAA 723 to neumožňuje. Počítačovou kartu TUL lze využít v zapojení, kde bude možné řídit integrovaný obvod zdroje pomocí referenčního napětí v maximálním rozsahu od -10 V do +10 V. Pro propojení zdroje lze použít USB konektor, který zajistí propojení výstupu počítačové karty DA0_OUT a DA1_OUT s dvojicí napájecích zdrojů.

RS232

Počítačová architektura používá pro sériovou komunikaci rozhraní RS 232. Na fyzické vrstvě odpovídá logické **1** hodnota napětí -25V až -3V, logické **0** hodnota napětí +3V až +25V.

9. MĚŘENÍ

V dnešní době se měření provádí automatizovaně pomocí počítače. Obrovskou výhodou je automatický záznam hodnot pro delší časová měření. Struktura automatizované měření pro zatěžovací charakteristiky. (Obr. 37).



Obrázek 37.- Blokové schéma automatizovaného měření, znázorněn tok řídicích signálů

Zatěžovací charakteristiky, časová stabilita, funkce proudové pojistky a byly naměřeny za pomoci proudové zátěže Sorensen a naprogramovaného kódu při použití sběrnice GPIB. Naměřená data byla ukládána do souboru a následně pomocí programu Matlab vyhodnocena. U charakteristik byla provedena aproximace a vypočítán vnitřní odpor (podle 1) zdroje pro jmenovitá napětí.

Zvlnění a odezva na změnu proudu byla naměřena na osciloskopu DSO 3062A.s výrobním číslem CN47126895. Pro zatížení byla použita proudová zátěž Sorensen. U osciloskopu nebyla karta GPIB, pouze sběrnice USB. Proto nebylo možné jej ovládat přímo z počítače. Mohli jsme kopírovat pouze obraz stínítka, do počítače, nikoliv přenášet vzorky časových průběhů. S určitými problémy je možné přenášet vzorky signálů i přes rozhraní USB, nepodařilo se nám však tuto možnost zprovoznit. Na ústavu jsou nejméně tři kvalitnější osciloskopy řízené z počítače, v době měření však žádný z nich nebyl k dispozici.

V témže uspořádání a režimu byla měřena dynamická odezva zdroje, což je časový průběh napětí při skokové změně zatěžovacího proudu.

Za pomoci autotrasformátoru byla naměřená závislost vstupního síťového napětí na usměrněném výstupním napětí laboratorního regulovatelného zdroje.

Naměřené hodnoty přímo přenesené do počítače byly zpracovány v podstatě standardním způsobem pomocí vlastních programů v MATLABu. Jednalo se zejména o zatěžovací charakteristiky. V tomto případě byla naměřená data aproximována lineární závislostí a z jejích koeficientů určeno napětí naprázdno a vnitřní odpor.

V těch případech, kdy byly získány pouze kopie obrazovky na osciloskopu Agilent řady 3000, nebyla možná žádná standardní úprava dat. Polokvantitativní výsledky byly přímo odečteny z příslušných grafů a jsou zatíženy poměrně velkou chybou.

10. VÝSLEDKY

V této části uvádíme typické výsledky měření těchto základních charakteristik zdroje:

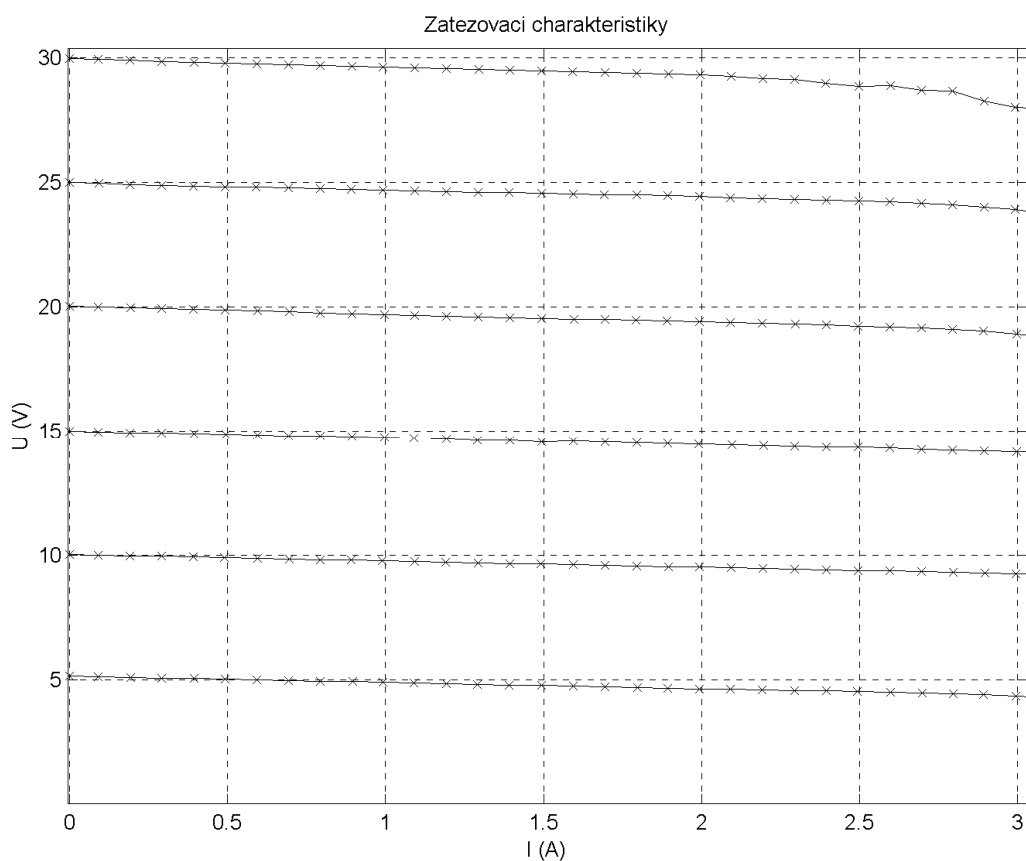
1. Zatěžovací charakteristika
2. Charakteristika v oblasti proudového omezení
3. Zvlnění
4. Dynamická charakteristika
5. Vliv síťového napětí
6. Časová stabilita

10.1. Zatěžovací charakteristika

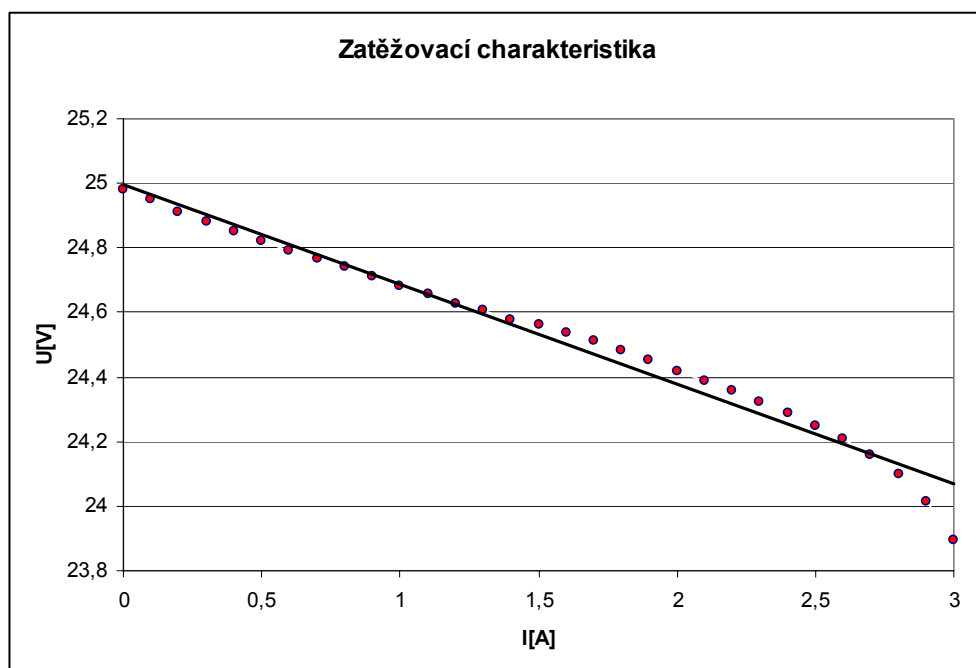
Zatěžovací charakteristika pro levou stranu zkonstruovaného zdroje je na obr. 38. Parametrem je výstupní napětí, měněné po 5 V. Detailní pohled na zatěžovací charakteristiku pro napětí 25 V je na obr. 39, což je současně nejkomplikovanější případ. Průběh lze poměrně dobře charakterizovat přímkou až do proudu asi 2,7 A, tedy poslední tři body by se měly vyloučit. Pak vyjde daleko lepší shoda s experimentem a vnitřní odpor bude poněkud nižší. Nepozorností byla aproximována celá charakteristika. Z této méně přesné aproximace vychází vnitřní odpor kolem 0,3 Ω . Pro výstupní napětí do 20 V je přímková aproximace možná až do maximálního proudu 3 A, viz obr. 38 a vnitřní odpor není zatížen systematickou chybou.

Vnitřní odpor poněkud závisí na výstupním napětí jak uvádí tab. 3 a obr. 40. Z obr. 40 je zřejmé, že s růstem výstupního napětí lineárně stoupá s koeficientem asi 0,001 Ω/V .

Při sériovém zapojení obou zdrojů lze získat napětí do 60 V a lze měřit závislost vnitřního odporu na napětí v dvojnásobném intervalu. Touto možností jsme se pro nedostatek času nezabývali.



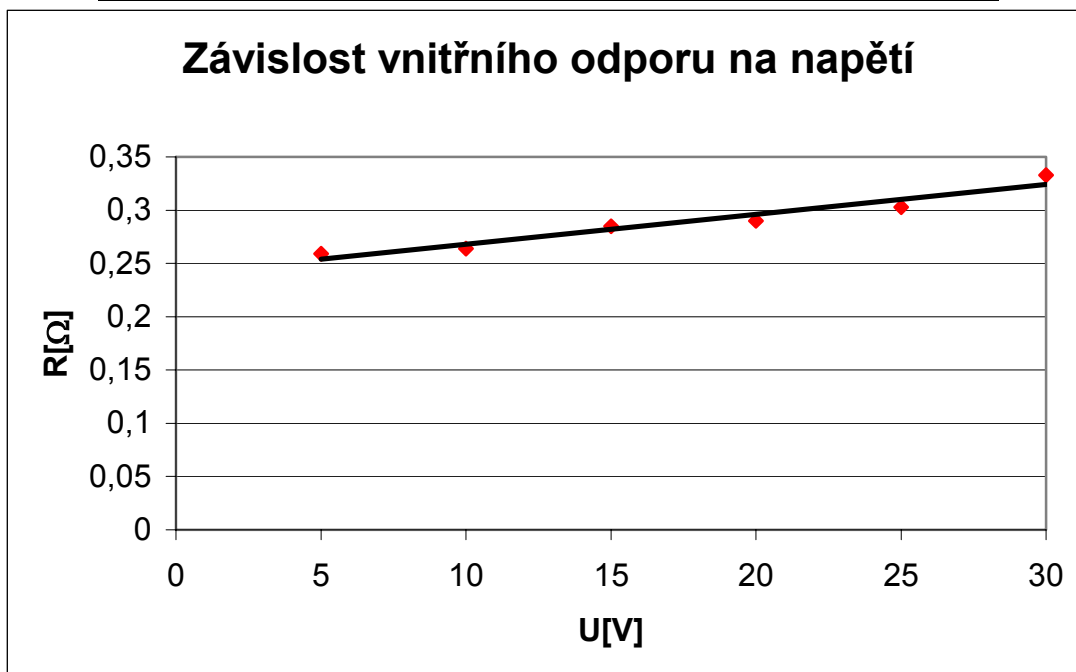
Obrázek 38 -Zatěžovací charakteristika zkonstruovaného zdroje pro levou stranu



Obrázek 39 -Speciální případ zkonstruovaného zdroje pro levou stranu pro 25 V, vnitřní odpor $R_i = 0,303 \Omega$

Tabulka 3. Hodnoty vnitřních odporů pro jmenovitá napětí

U[V]	5	10	15	20	25	30
Ri[Ω]	0,259	0,264	0,285	0,29	0,303	0,333
Gi [s]	3,86	3,79	3,51	3,45	3,30	3,00



Obrázek 40.-Závislost vnitřního odporu na napětí

Automatizovaného měření poskytuje data velmi rychle a snadno. Toto jsme využili pro srovnávací měření zatěžovacích charakteristik jiných zdrojů:

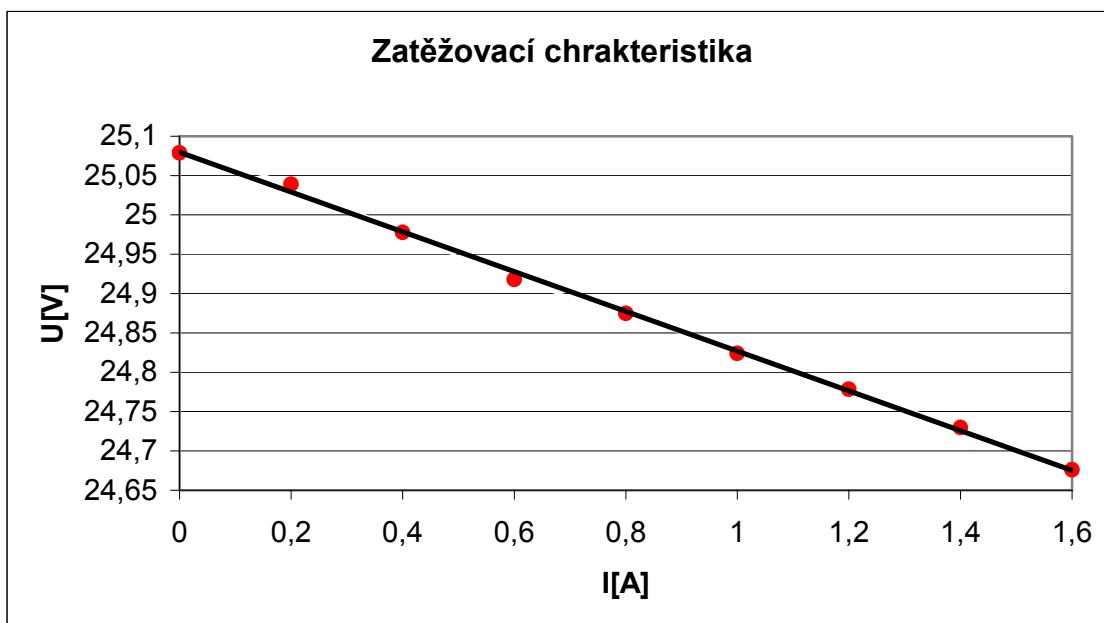
1. Řízený stabilizovaný zdroj na laboratorním stole, obr. 41 dále školní zdroj
2. Komerční zdroj HADEx NP 9615, obr. 42
3. Komerční zdroj Statron 2229, obr. 43

Všechny charakteristiky jsou pro jednotné napětí 25 V, takže je možné srovnání kvality jednotlivých zdrojů.

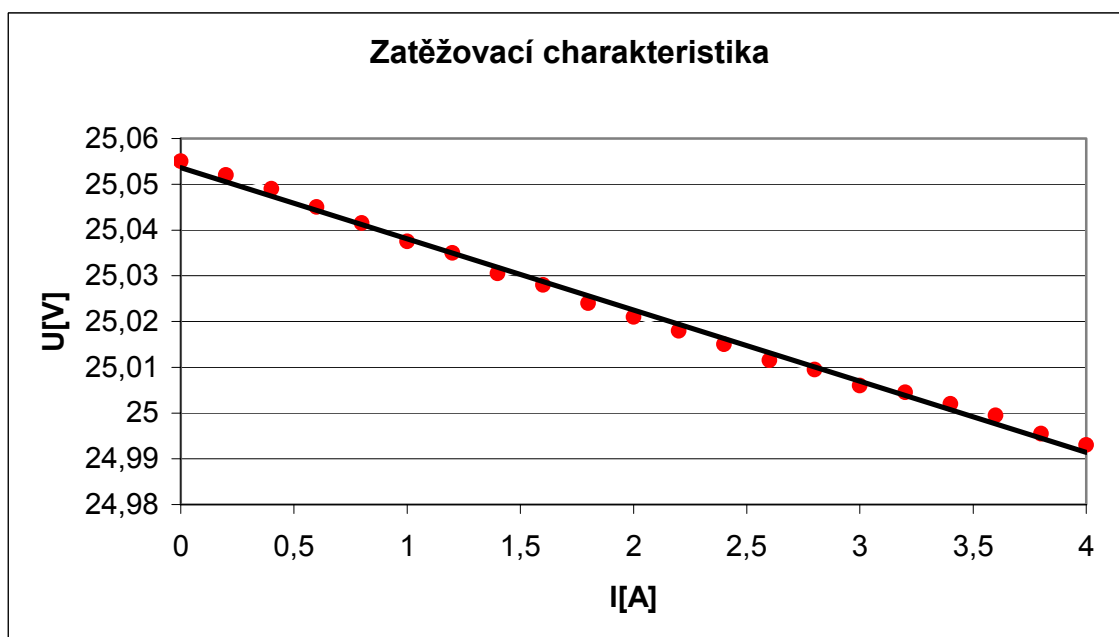
Vnitřní odpory těchto zdrojů včetně zkonstruovaného jsou v tabulce 4. Vnitřní odpor školního zdroje je srovnatelný se zkonstruovaným, komerční zdroje mají o řád nižší vnitřní odpor.

Tabulka 4. Vnitřní odpory jednotlivých zdrojů pro $U = 25 \text{ V}$

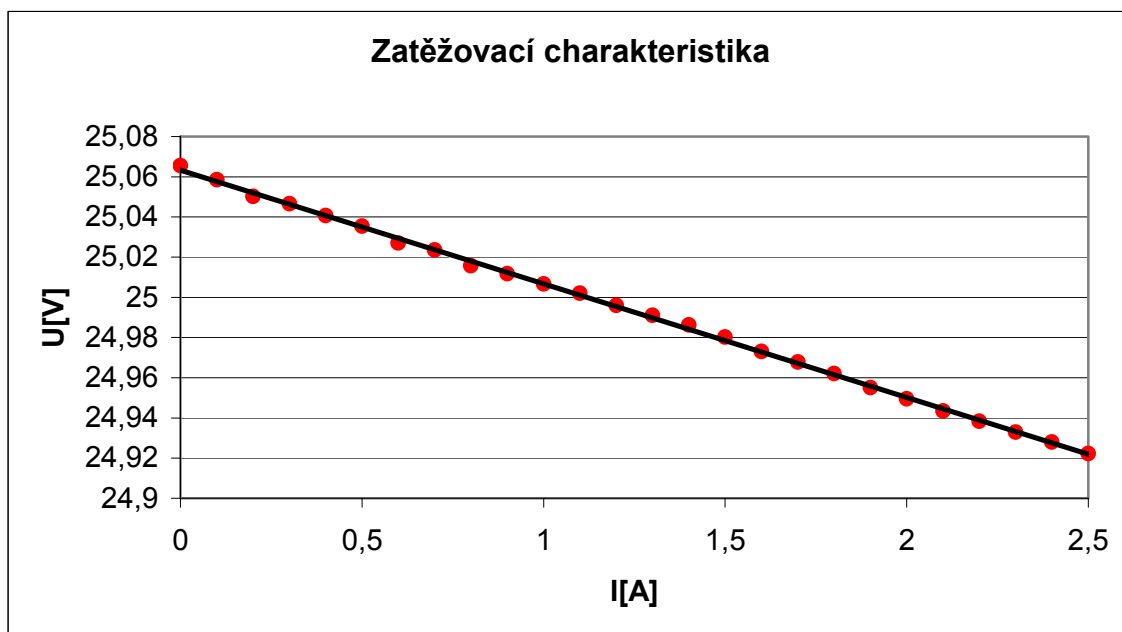
	Ri [Ω]
Zdroj zkonstruovaný	0,300
Zdroj školní	0,270
Zdroj HADEx NP 9615	0,016
Zdroj STATRON 2229	0,058



Obrázek 41 -Speciální případ školního zdroje s IO MAA 723 pro 25 V, vnitřní odpor $R_i = 0,270 \Omega$



Obrázek 42 -Speciální případ zdroje HADEx NP 9615 pro 25 V, vnitřní odpor $R_i = 0,016 \Omega$

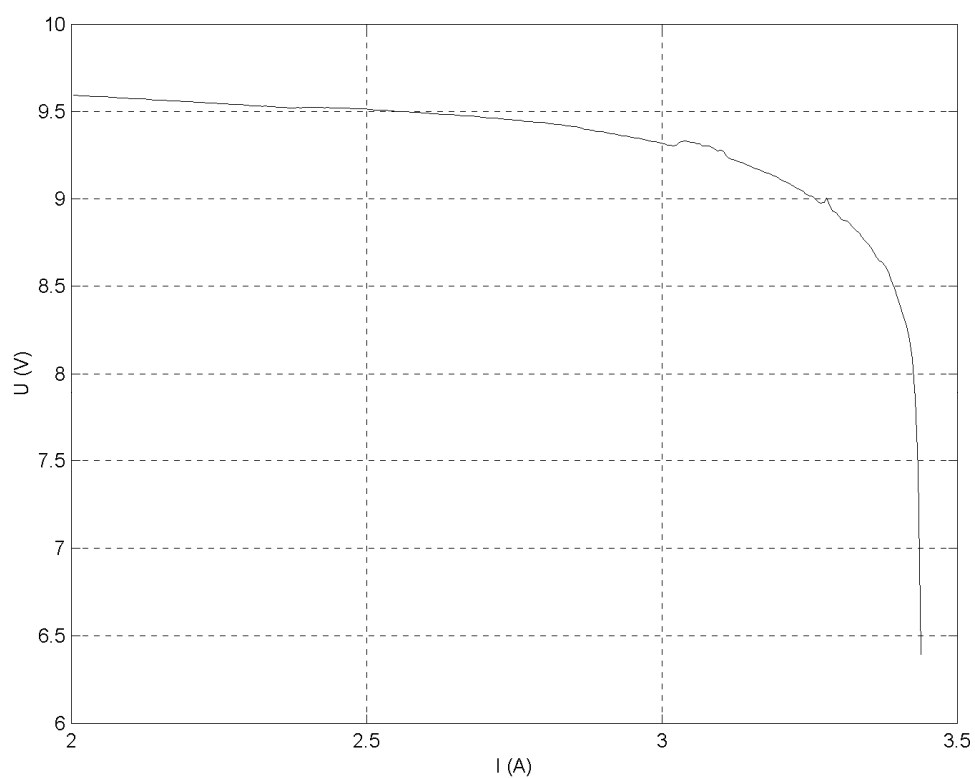


Obrázek 43-Speciální případ zdroje STATRON 2229 pro 25, vnitřní odpor $R_i = 0,058 \Omega$

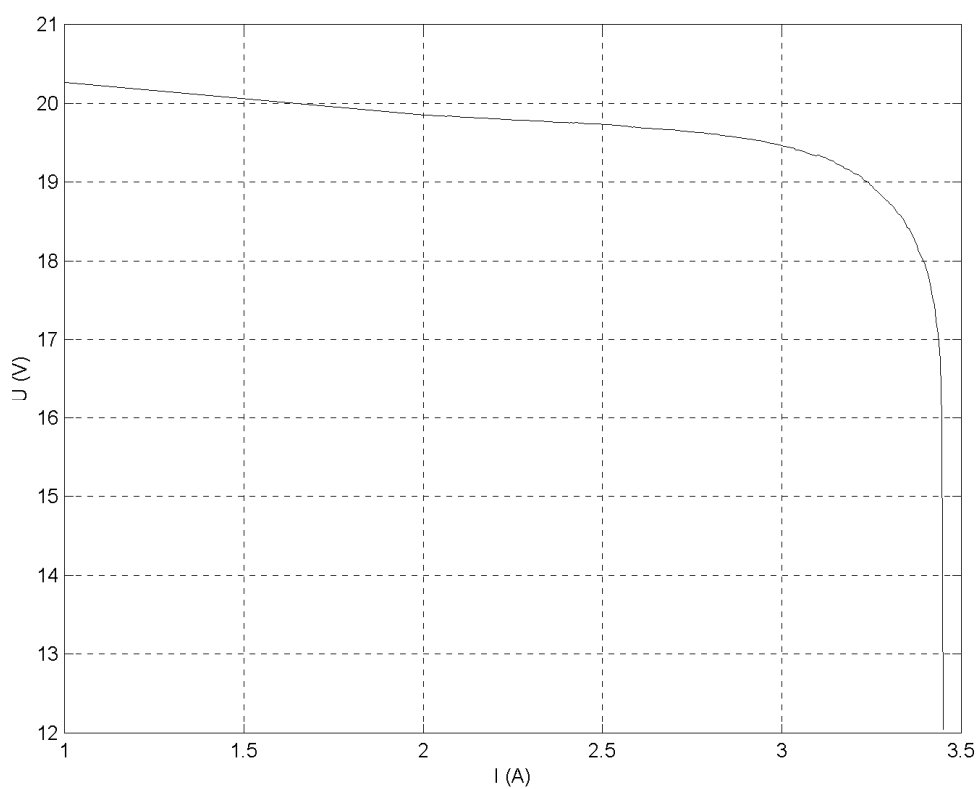
10.2. Charakteristiky v oblasti proudového omezení

Tyto charakteristiky pro tři různá napětí naprázdno jsou na obr. 44 až 46. Je zřejmé, že v oblasti proudového omezení ze zdroj chová přibližně jako zdroj proudu. Zejména na obr. 46 překvapí určitá nestabilita. Nebyl však čas podrobněji se zabývat tím, zda je to vlastnost zdroje nebo vliv měřící aparatury.

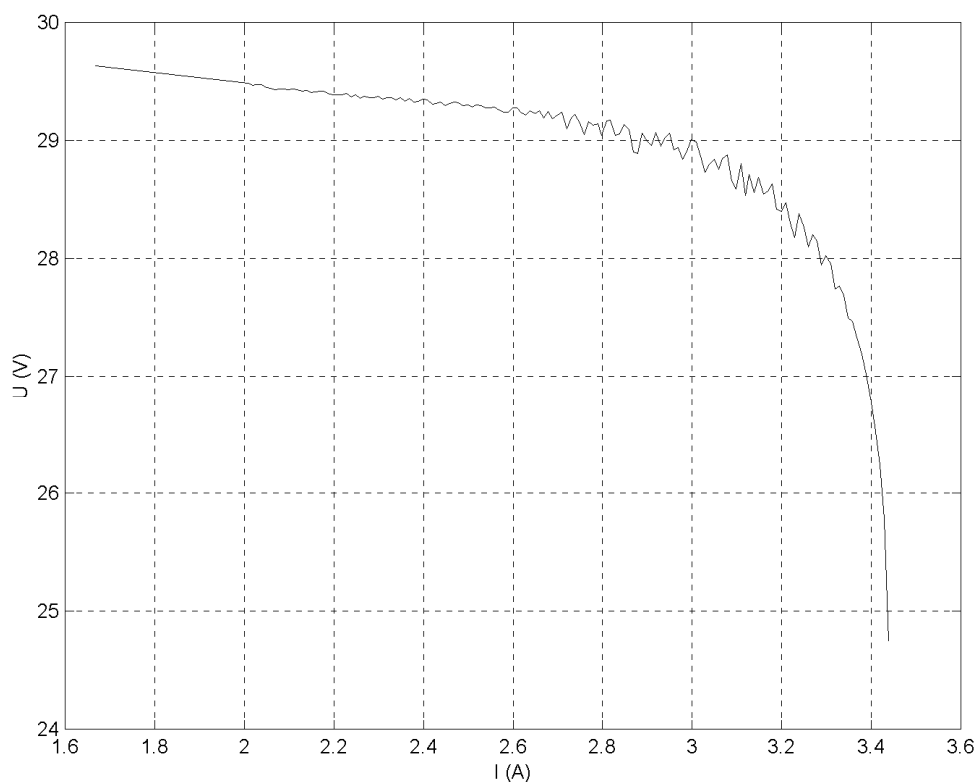
Kvantitativnímu vyhodnocení brání malý počet bodů v této oblasti. Elektronická zátěž neumožnila jemné nastavení proudů v blízkém okolí zkratového proudu. Pro spolehlivější měření by byla nutná sada malých odporů a ruční měření. Tyto odpory by musely být na výkon desítky W a o hodnotách od 10Ω do desetin ohmů. To by znamenalo zakoupit celou sadu a přizpůsobit případně vyrobit z odporového drátu. Příprava tohoto měření by byla časově náročná, proto pro nedostatek času jsme tuto zajímavou charakteristiku dále nezkoumali.



Obrázek 44.-Průběh funkce proudové pojistky při $U_0=10V$



Obrázek 45.- Průběh funkce proudové pojistky při $U_0=20V$



Obrázek 46.- Průběh funkce proudové pojistky při $U_0=30V$

10.3. Zvlnění napětí

Zvlnění napětí snímané osciloskopem Agilent řady 3000 je na obr. 47 až 49 pro tři různé hodnoty zatěžovacího proudu. Průběhy jsou silně zašuměny poměrně vysokými frekvencemi, příčinou budou asi všudypřítomné řízené zdroje. Odšumění bylo možné provést minimálně dvěma základními způsoby:

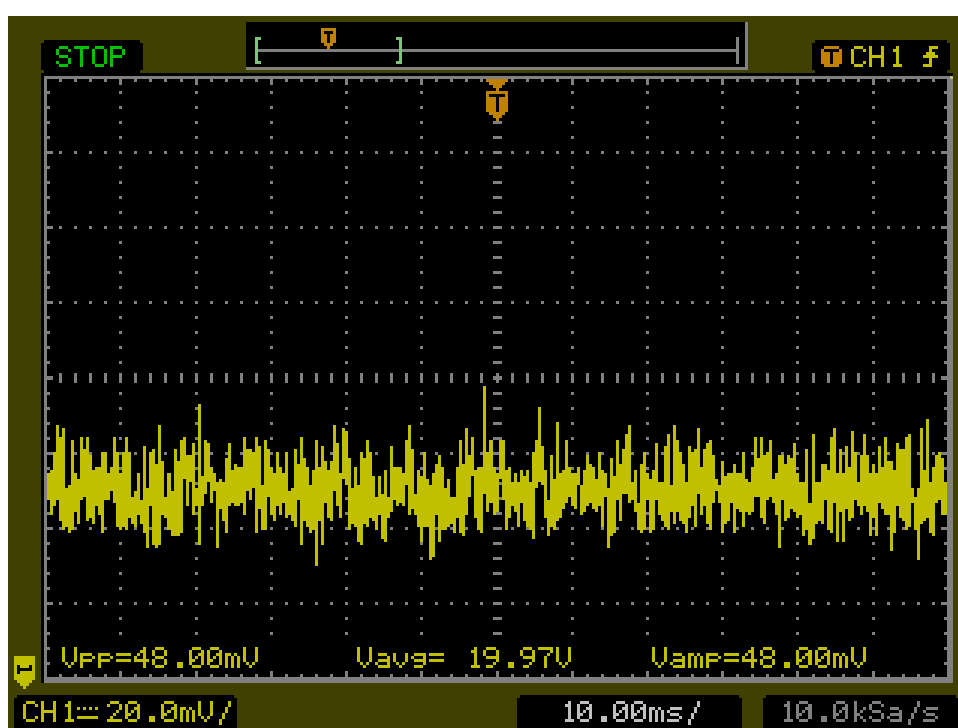
1. Kvalitnějším osciloskopem, který provádí průměrkování až z 256 průběhů. Nahodilý šum se výrazně redukuje a zbude zvlnění.
2. Přenesení dat do počítače a redukce šumu aplikací klouzavého průměru.
3. Polokvantitativní údaje o zvlnění by se daly získat rychlou Fourierovou transformací FFT, kterou tyto osciloscipy mají.

Poněvadž se ani jedna z možností nepodařilo realizovat, je nutno zvlnění odhadnout. Z údajů uvedených na obrázcích 47 až 49 má význam jen střední hodnota, hodnotu špička-špička a amplituda se vztahují k nahodilému šumu. Na základě měřítka na ose napětí lze odhadnout zvlnění takto, viz tabulka 5

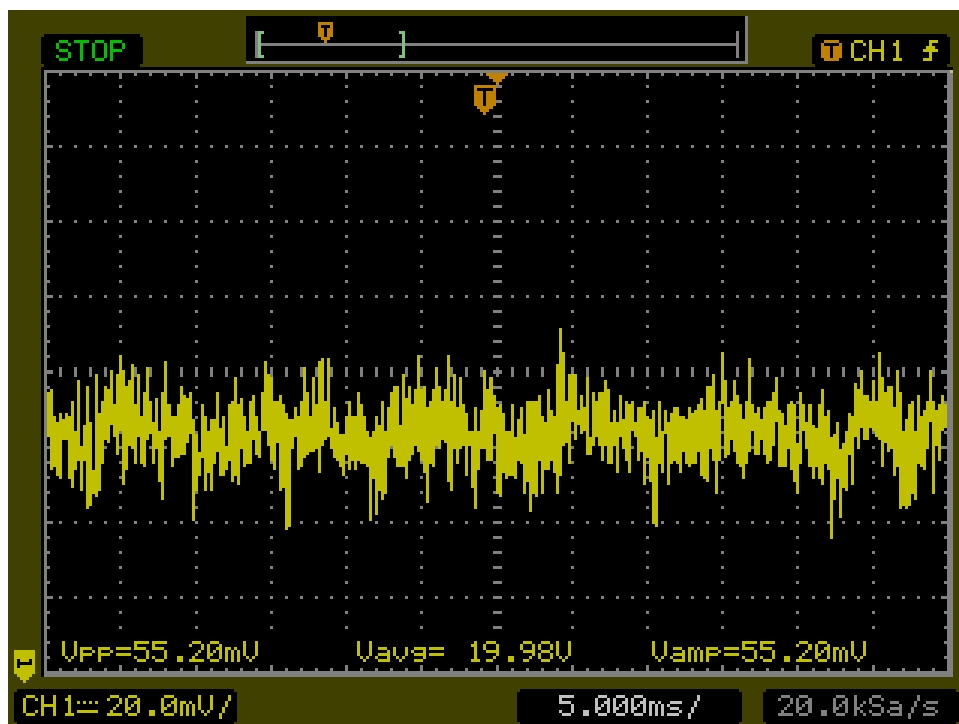
Tabulka 5. – Zvlnění napětí při příslušné zátěži

Odebíraný proud	Zvlnění	Obrázek
1A	Neměřitelné	47
2A	Asi 5 mV	48
3A	Asi 10 mV	49

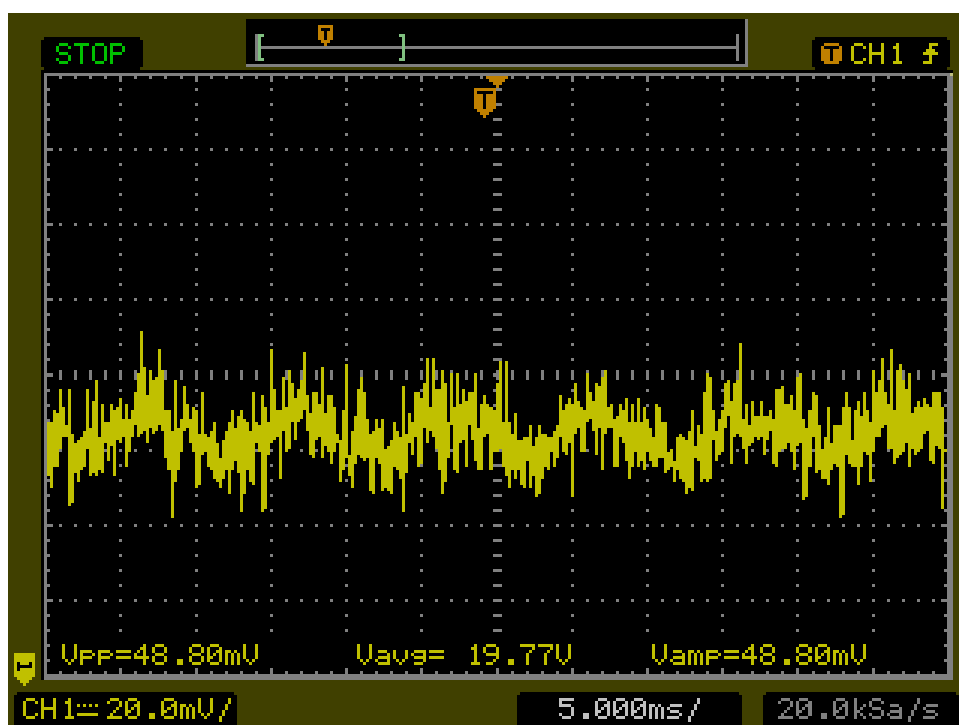
Z obrázku 49 lze odhadnout periodou průběhu zvlnění na 10 ms, jedná se tedy skutečně o zvlnění a ne vliv sítě, kde by byla perioda 20 ms



Obrázek 47 .- Zvlnění napájecího zdroje při zátěži 1A



Obrázek 48 .- Zvlnění napájecího zdroje při zátěži 2A



Obrázek 49 .- Zvlnění napájecího zdroje při zátěži 3A

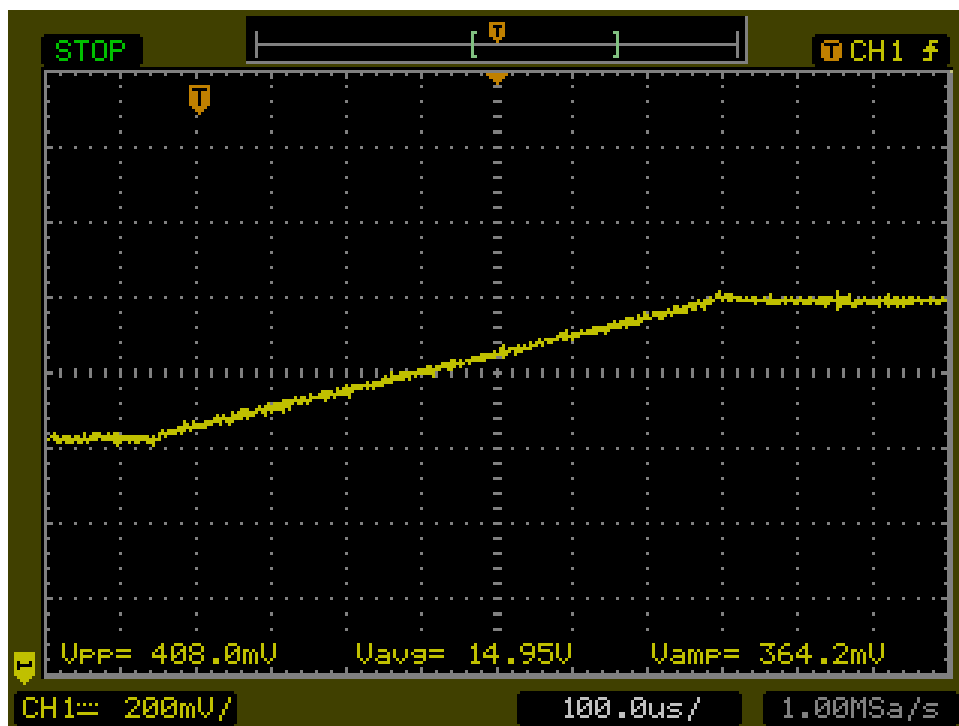
10.4. Dynamická charakteristika

Dynamickou charakteristikou rozumíme odezvu zdroje na skok proudu. Elektronická zátěž umožní skokovou změnu proudu buď periodicky nebo jednorázově. Při měření byl zvolen druhý případ – skoková změna proudu. Zobrazení průběhů na osciloskopu bylo v tomto případě obtížnější, poněvadž bylo nutné nastavit spuštění časové základny v režimu Start-Stop. Typické výsledky jsou na obr. 50 a 51 pro skokovou změnu o 2 A, Obr. 52 a 53 zobrazují totéž pro skokovou změnu o 3 A. Ve dvojici je první obrázek pro pokles a druhý pro nárůst proudu. Při změně proudu o 3 A jsou na počátku a konci přechodového jevu zákmity.

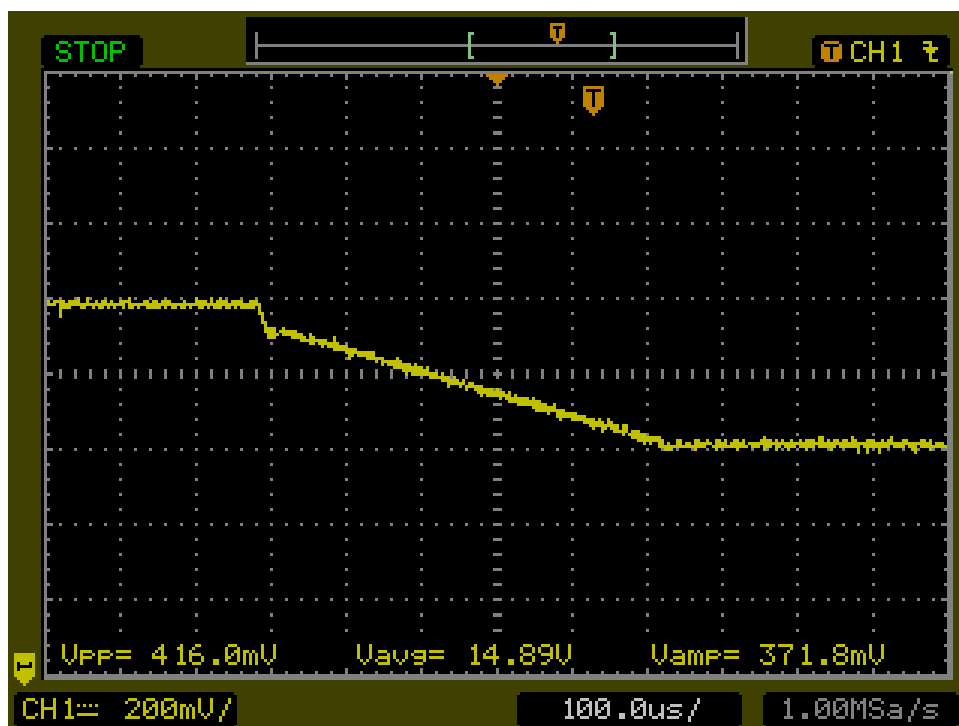
Změna proudu realizovaná elektronickou zátěží není ideální skok, typická doba potřebná pro změnu je kolem 1 ms. Poněvadž na osciloskopu nebyl použit jako druhý graf časový průběh proudu, nemůžeme odhadnout relaxační dobu zdroje, pouze uvádíme celkovou dobu do ustálení. Z průběhů tedy můžeme určit pouze změnu napětí při změně proudu, což udává tabulka 6. Ve sloupci charakteristika je změna napětí, která odpovídá zvolené změně proudu podle statické charakteristiky na obr. 38.

Tabulka 6. – Skoková zátěž

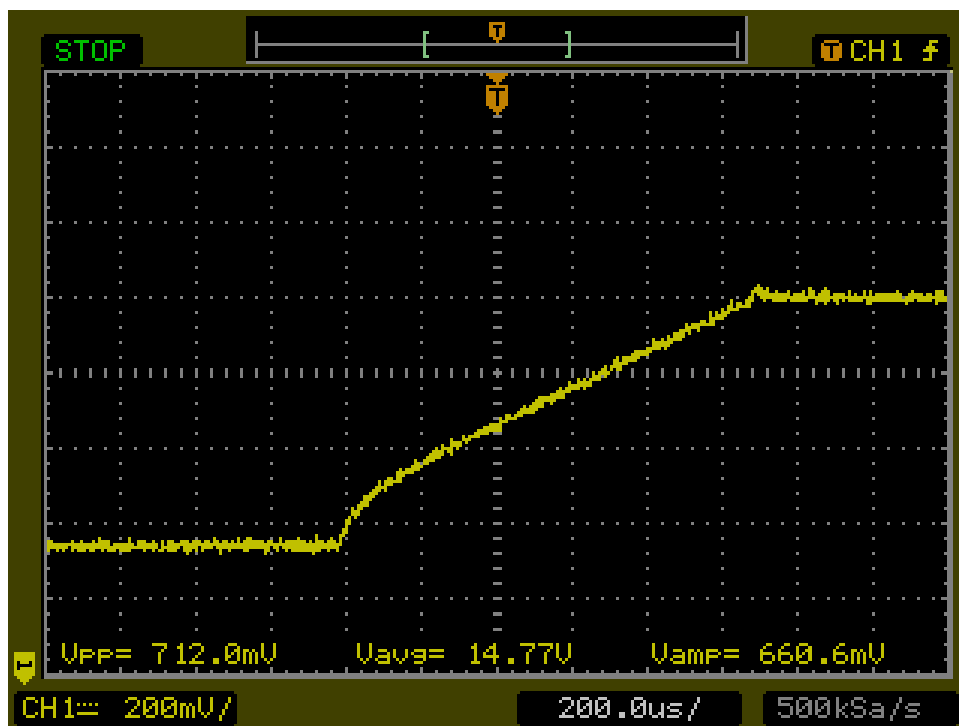
Změna proudu	Směr	Časový průběh	Charakteristika	Doba [μ s]
2	nárůst	416 mV	600 mV	750
2	pokles	408 mV	600 mV	550
3	nárůst	416 mV	900 mV	1100
3	pokles	712 mV	900 mV	870



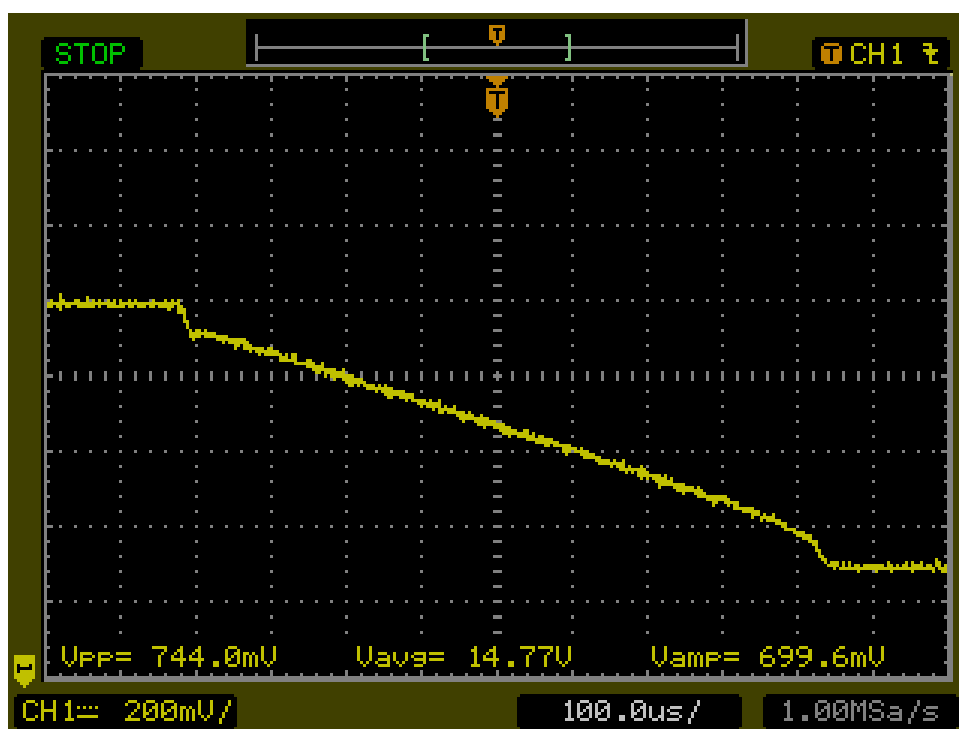
Obrázek 50 .- Skoková zátěž 2A, pokles



Obrázek 51 .- Skoková zátěž 2A, nárůst



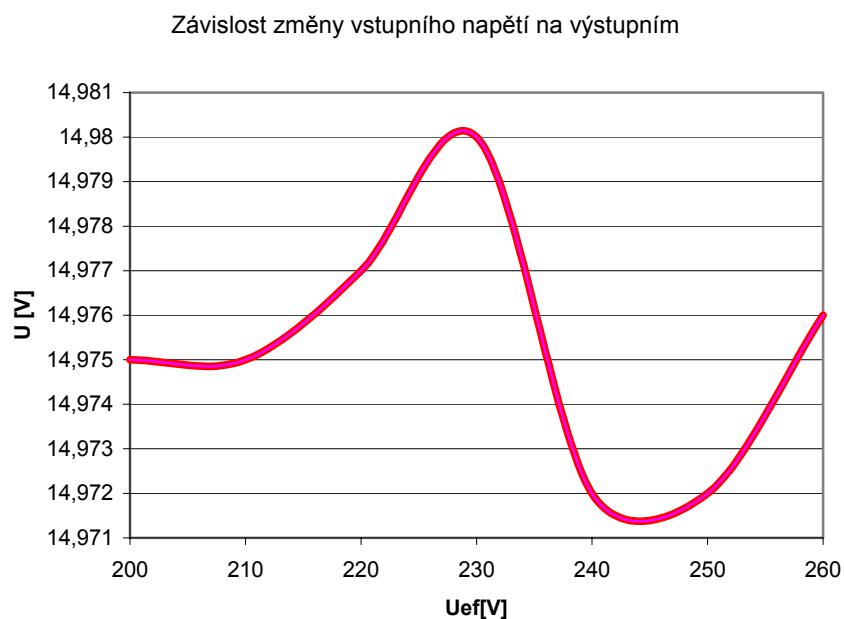
Obrázek 52 .- Skoková zátěž 3A, pokles



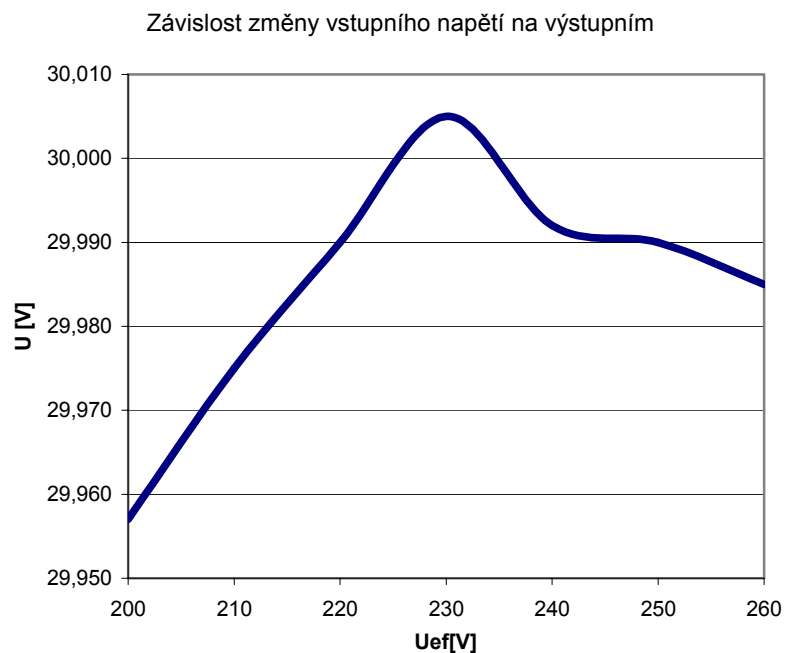
Obrázek 53 .- Skoková zátěž 3A, nárůst

10.5. Vliv změny síťového napětí

Vliv změny síťového napětí v mezích povolených normou je na obr. 54 a 55 po řadě pro levý a pravý zdroj. Průběhy jsou různé, poněvadž se jedná o různá výstupní napětí. Tedy nemusí jednoznačně ukazovat na nesymetrii obou zdrojů. Změna výstupního napětí zdroje způsobená povoleným kolísáním napětí sítě je minimální.



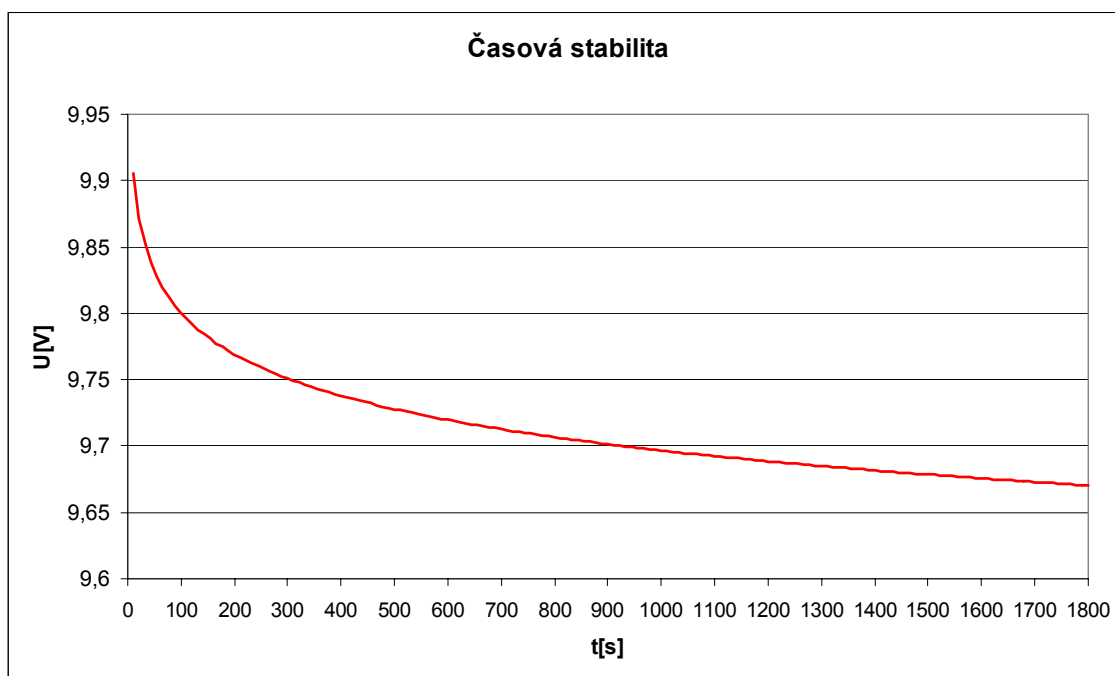
Obrázek 54.-Naměřeno na levém modulu napájecí zdroje při napětí 15 V



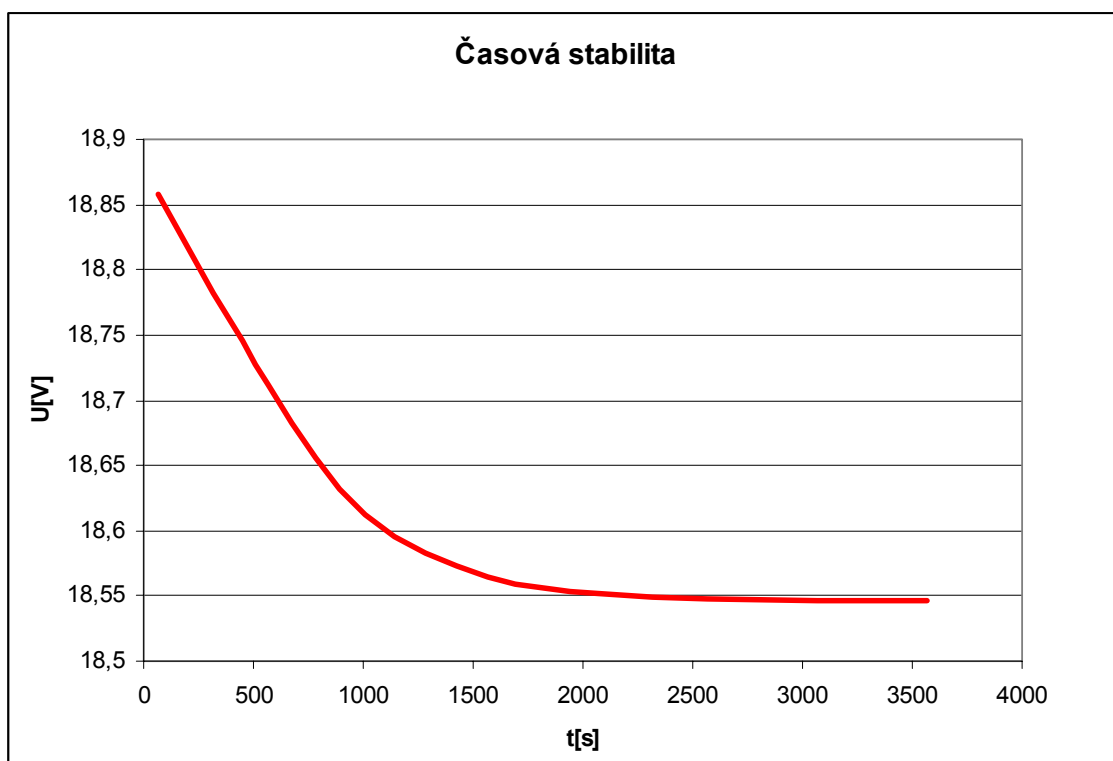
Obrázek 55.-Naměřeno na pravém modulu napájecí zdroje při napětí 30 V

10.6. Časová stabilita

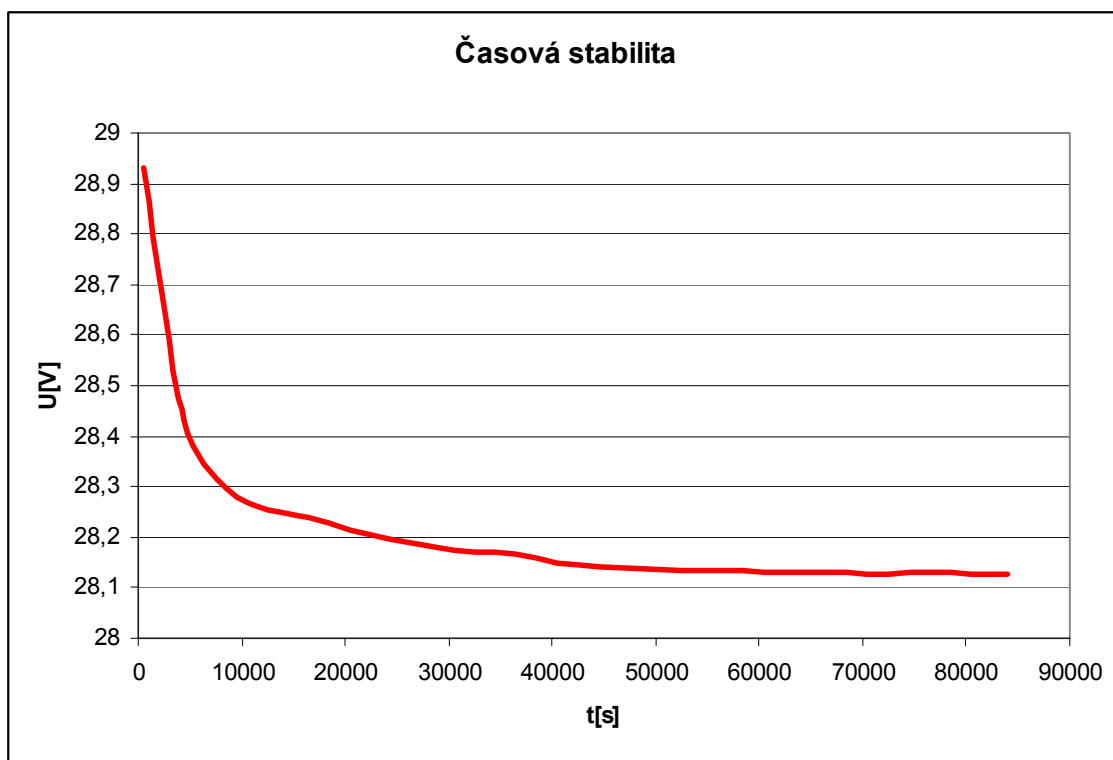
Časovou stabilitou rozumíme časový průběh výstupního napětí měřený po dlouhou dobu. Časové průběhy byly měřeny při teplotě prostředí zhruba 20 °C. Po každém měření se nechal napájecí zdroj vychladnout. Na obr. 56 až 58 jsou průběhy výstupního napětí naprázdno měřeného po dobu půl hodiny, jedné hodiny a jednoho dne. Z obr. 56 a 57 je zřejmé, že k ustálení výstupního napětí dochází po době delší než půl hodiny. Tato doba se obvykle udává jako doba nutná pro zahřátí součástek. Překvapuje průběh dlouhodobé stability na obr. 58. Podle ní se výstupní napětí dosti výrazně mění i po zahřátí, k dobrému ustálení by mělo dojít až po 12 hodinách. Zde však chybí větší počet experimentů.



Obrázek 56.-Časová stabilita s dobou měření 30 minut a $U=10V$



Obrázek 57.-Časová stabilita s dobou měření 60 minut a $U=20V$



Obrázek 58.-Časová stabilita s dobou měření 24 hodin a $U=30V$

11. DISKUZE

Zdroj byl navržen podle daného schématu, diskuse k návrhové a realizační této části tedy nemá valný smysl. Možnosti alternativního řešení jsou uvedeny v závěru.

V diskusi se omezíme na objektivní posouzení výsledků měření. Zopakujeme zde pro úplnost i to, co již bylo řečeno v kapitole Výsledky.

Poměrně přesné bylo měření vnitřního odporu. S rostoucím výstupním napětí vnitřní odpor poněkud vzrůstá, což je v souladu s běžnou praxí. Hodnotou vnitřního odporu, v porovnání s komerčními výrobky, patří zdroj do nižší kategorie. To je dáno použitými součástkami a není možnost výrazného zlepšení. Naopak poněkud horší stabilizace při mezních napětích a proudech by se dala odstranit.

Proudový omezovač převádí zdroj napětí v oblasti blízko maxima odebíraného proud na zdroj proudu. Měření v této oblasti však vyžaduje speciální sadu speciálních zatěžovacích odporů, proto se nepodařilo realizovat. V opačném případě by bylo možné určit náhradní obvod lineárního zdroje proudu, tvořený ideálním zdrojem proudu a paralelní vodivostí.

Zvlnění napětí se nepodařilo přesně změřit tím, že bylo použito nevhodných přístrojů. Nicméně i na nich bylo možno získat přibližné výsledky, tato možnost však byla opomínuta v důsledku časové tísně.

Dynamická měření, tj. odezva na jednotkový skok zatěžovacího proudu, jsou pravděpodobně současnými prostředky, které jsou k dispozici, nerealizovatelná. Na osciloskopu nebyl zobrazen průběh proudu při změně. Pokud by byl lineární, pak by lineární průběhy napětí ukazovaly na to, že zdroj reaguje téměř okamžitě. Poněvadž tomu tak není, na rychlou reakci můžeme soudit jedině z doby, po kterou změna trvala. Z tabulky 6 je zřejmé, že tato doba byla kolem 1 ms, což odpovídá údaji výrobce elektronické zátěže, že k nejrychlejší změně dojde během 1 ms. Relaxační doba je tedy současnými přístroji neměřitelná.

Vliv změny síťového napětí v povolených mezích je malý. K přesnějšímu posouzení chybí dostatek měření. Důležitých údajem je zjistit, od jakého síťového napětí přístroj spolehlivě pracuje, což jsme opomněli.

Měření časové stability potvrdilo, že napětí je zhruba stabilizované po uplynutí doby 30 minut, což se udává jak doba nutná k zahřátí. Při měření dlouhodobé časové stability je nutno mít přístroj, který má o řád lepší stabilitu než měřený objekt. Z obr. 58 je zřejmé, že v druhé polovině měření byla časová stabilita lepší než 0,1 procenta.

Přístroj by tedy měl mít stabilitu 0,01 procenta, což použitý dataloger nesplňuje. Navíc podrobné vyhodnocení časové stability vyžaduje mnoho měření v době nejméně jeden měsíc. Zde je k dispozici jediné měření.

12. ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo zkonstruovat napájecí zdroj s požadovanými parametry dle zadání. Zdroj bylo zapotřebí porovnat s komerčními výrobky na trhu a naměřit významné hodnoty a charakteristiky.

Zvolila se klasická koncepce napájecího zdroje, kde byl použit osvědčený integrovaný obvod MAA 723. Nejprve se zhotovily desky plošných spojů, následovalo osazení součástky, oživení zapojení a umístění do boxu. Kryt chrání výrobek před poškozením a pro ochraně pře dotykem se síťovým napětím. Na výrobku se proměřily zatěžovací charakteristiky, časová stabilita, zvlnění, vliv síťového napětí a dynamické vlastnosti na aparatuře sestávající z elektronické proudové zátěže, osciloskopu a měřidel napětí a proudu.

Snažili jsme se o důkladné změření všech základních vlastností. Mnohá z těchto měření výrobci neudávají, např. vnitřní odpor. Proto jsme jej měřili i pro komerční dostupné zdroje. Zkoušeli jsme i dynamická měření. O nich se výrobci rovněž nezmiňují, asi z toho důvodu, že kvalitní skokovou změnu zátěže lze realizovat těžko. Nevhodné přístroje nám naopak neumožnily dobré proměření jiných vlastností, které výrobci uvádějí.

Dále shrnujeme základní vlastnosti a charakteristiky zdroje a porovnáváme je s vlastnostmi komerčních výrobků :

1. Rozsahem napětí 30 V a proudu 3 A se neliší od typických výrobků.
2. Při napětí blízkém 30 V je při vysokých odebíraných proudech poněkud horší stabilita napětí. To komerční přístroje nemají. Chyba je asi v nevhodných hodnotách součástek.
3. Byly proměřeny zatěžovací charakteristiky a z nich odečten vnitřní odpor. Čím menší je vnitřní odpor, tím je napětí méně závislé na odebíraném proudu. Vnitřní odpor našeho zdroje je zhruba stejný jako vnitřní odpor školního zdroje. To nepřekvapí, byl použit stejný obvod. Komerční přístroje však používají novější obvody, proto mají vnitřní odpor menší a tím lepší vlastnosti.
4. Dynamické vlastnosti, tj. odezvu na jednotkový skok zátěže, výrobci neudávají. Pokusili jsme se je měřit, nebyla však k dispozici zátěž s dostatečně rychlou změnou. Prudká změna zátěže téměř nezmění výstupní napětí. To zřejmě platí i pro ostatní zdroje.

5. Zvlnění napětí bylo obtížně vyhodnotitelné, hodnota však odpovídá tomu, co uvádějí výrobci.
6. Vliv kolísání napětí sítě je zanedbatelný jako u ostatních výrobků.
7. Ukazuje se, že zdroj dává zhruba konstantní napětí po půl hodině prohřátí. Výrobci to obvykle neuvádějí a nestihli jsme naměřit časovou stabilitu u jiných výrobků. Bude to ale asi tatáž doba, půl hodiny, jak píše literatura. Spolehlivé měření dlouhodobé stability vyžaduje měsíce a v rámci práce je objektivně nerealizovatelné.

Z tohoto přehledu je zřejmé, že zdroj parametry zdroje odpovídají použitému zapojení a součástkám. Ve většině případů přesto odpovídají standardu. Zlepšení lze očekávat jen od nových obvodů. Pokud neuvažujeme práci, se zdroj jeví v závislosti cena a výkon jako nejvýhodnější.

Zadání práce bylo splněno ve všech bodech i když v posledním bodu, řízení napájecího zdroje přes rozhraní RS232 nebo USB negativně. Zapojení zdroje ovládání pomocí počítačové karty PCI 1711 přímo neumožňuje. Alternativní řešení by vyžadovalo velký zásah do návrhu a zapojení.

Při novém návrhu by bylo určitě vhodné přidat aktivní chlazení a to nejlépe v podobě dvojice ventilátorů. Další možností je přepínat vinutí transformátoru. Pro praktické použití by bylo dobré přidat několik různě odstupňovaných omezovačů proudu. Poněvadž jsou k dispozici dva zdroje, lze je v principu zapojit i paralelně a tím získat dvojnásobný proud. Není to však úloha jednoduchá. Bylo by však nutno zajistit přesně stejná napětí na obou zdrojích, což by vyžadovalo jedno řízení a dále korekční obvod na malé odchylky napětí obou zdrojů. Pro realizaci zdroje s regulací pomocí počítačové karty je zapotřebí zapojení s napětově řízeným zdroj.

13. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] GES-ELECTRONICS; Katalog 2002
- [2] GES-ELECTRONICS; Katalog 2003
- [3] GM ELECTRONIC s. r. o. ; Katalog 2002; Praha
- [4] Amaro s. r. o. ; Ročník 1998 Praha
- [5] Napájecí zdroje 2000 SPŠE (Pardubice)
- [5] <http://www.ges.cz/>
- [6] www.wikipedia.cz
- [7] Obrázky z prostředí EAGLE <http://209.85.135.104/>

14. PŘÍLOHY A SOUBORY

Elektronická verze této dokumentace obsahuje přílohy

- [1] Příloha A Zatěžovací charakteristiky naměřené pomocí proudové zátěže
- [2] Příloha B Zatěžovací charakteristiky naměřené pomocí multimetrů
- [3] Příloha C Zdrojový kód pro měření pomocí proudové zátěže
- [4] Příloha D Charakteristické parametry pro počítačovou kartu PCI 1711
- [5] Příloha E Desky plošných spojů
- [6] Příloha F Programy pro tvorbu plošných spojů

Příloha CD

- zadání bakalářské práce
- text bakalářské práce
- desky plošných spojů
- charakteristiky zvlnění a skokové změny z osciloskopu
- manuál proudové zátěže počítačové karty PCI 1711
- katalogové listy ICL 7107
- použité součástky